

Année 1961

THÈSE

POUR LE

783^{N°}

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PAR

DUVELLEROY Michel Albert

né le 22 Juin 1930 à La Plaine S' Denis (Seine)

Présentée et soutenue publiquement le 23 JUIN 1961

La Glottographie en Module et en Phase

Moyen d'étude des schémas électriques équivalents au Larynx

Docteur Michel DUVELLEROY

Ancien Externe des Hopitaux de Paris

LA GLOTTOGRAPHIE EN MODULE ET EN PHASE
MOYEN D'ÉTUDE DES SCHÉMAS ÉLECTRIQUES EQUIVALENTS AU LARYNX

THÈSE DOCTORAT - PARIS 1961

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. Aubin (A.), Bénard (H.), Bulliard (H.), Cadenat (F.),
 Chabrol (E.), Champy (C.), Debré (R.), Gastinel (P.), Guillaïn (G.),
 Halphen (E.), Hazard (R.), Heuyer (G.), Lantuejoul (P.),
 Laroche (G.), Lévy-Solal (E.), Lian (C.), Loeper (M.), Marion (G.),
 Mathieu (P.), Mocquot (P.), Mondor (H.), Monod (R.), Moreau (R.), Ol
 Olivier (E.), Pasteur Vallery-Radot, Petit-Dutaillis, Richet (C.),
 Strohl (A.), Tanon (L.)

DOYENLéon BINET
 Membre de l'Institut

ASSEESSEUR Jean VERNE.

II. - PROFESSEURS

MM.

Anatomie	DELMAS (A.)
Anatomie pathologique	DELARUE (J.)
Anesthésiologie	BAUMANN (J.)
Biochimie médicale	JAYLE (M.F.)
" " (Prof. à titre personnel)	ETTORI (J.)
" " (Prof. à titre personnel)	SCHAPIRA (G.)
Biologie appliquée à l'Education physique et aux sports	CHAILLEY-BERT (P.)
Biologie médicale	FAUVERT (R.)
" " (Prof. à titre personnel)	BOURLIERE (F.)
Cancérologie médicale et sociale	BERNARD (J.)
Clinique carcinologique chirurgicale (Necker)	REDON (H.)
Clinique cardiologique (Broussais)	MOUQUIN (M.)
Beaujon	SICARD (A.)
Cochin	N
Hotel-Dieu	PATEL (J.)
Cliniques chirurgicales ... Pitié	CORDIER (G.)
Saint-Antoine	GOSSET (J.)
Salpêtrière	MOULONGUET (P.)
Tenon	LORTAT-JACOB (J.L.)
Clinique de chirurgie infantile et orthopédique (Enfants-malades)	FEVRE (M.)
Clinique chirurgicale orthopédique et réparatrice (Cochin)	MERLE D'AUBIGNE (R)
Clinique de chirurgie cardio-vasculaire (Broussais)	GAUDART-D'ALLAINES
Clinique de chirurgie pleuro-pulmonaire (Laennec) ..	MATHEY (J.)
Clinique endocrinologique (Pitié)	DECOURT (J.)
Clinique de génétique médicale (Enfants-malades) ..	LAMY (M.)
Clinique gynécologique (Broca)	FUNCK-BRENTANO (P.)
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques (St Louis)	DEGOS (R.)
Clinique des maladies des enfants (Enfants-malades)	CATHALA (J.)

Clinique des maladies infectieuses (Claude Mernard)	MOLLARET (P.)
Clinique des maladies mentales et de l'encéphale (Ste Anne)	DELAY (J.)
Clinique des maladies métaboliques (Necker)	HAMBURGER (J.)
Clinique des maladies du sang (Broussais)	MARCHAL (G.)
Clinique des maladies du système nerveux (Salpêtrière)	N
Boucicaut	LENEGRE (J.)
Broussais	SOULIE (P.)
Cochin	JUSTIN-BESANCON (L.)
Cochin	BROUET (G.)
Hotel-Dieu	BARIETY (M.)
Pitié	DREYFUS (G.)
St-Antoine	KOURILSKY (R.)
Clinique médicale d'hydrologie thérapeutique et climatologie (Bichat)	DEBRAY (C.)
Clinique médicale propédeutique (Broussais)	GENNES (L. de)
Clinique médico-sociale du diabète sucré et des maladies de la nutrition (Hotel Dieu)	DEROT (M.)
Clinique de neuro-chirurgie (Pitié)	DAVID (M.)
Clinique neurologique (Salpêtrière)	GARCIN (R.)
Cliniques obstétricales Baudelocque	LACOMME (M.)
Foch (Suresnes)	MERGER (R.)
Clinique obstétricale et gynécologique (Port-Royal)	VARANGOT (J.)
Clinique ophtalmologique (Hotel Dieu)	RENARD (G.)
Clinique oto-rhino-laryngologique (Lariboisière) ..	AUBRY (M.)
Clinique de pédiatrie et de puériculture (St Vincent de Paul)	LELONG (M.)
Clinique de pédiatrie sociale (Enfants malades) ..	MARIE (J.)
Clinique de pneumo phtisiologie (Laennec)	BERNARD (E.)
Clinique psychiatrique infantile (Salpêtrière) ..	MICHAUX (L.)
Clinique de rhumatologie médicale et sociale (Cochin)	COSTE (F.)
Clinique stomatologique (Pitié)	DECHAUME (M.)
Clinique thérapeutique chirurgicale (Vaugirard) ..	N
Clinique thérapeutique médicale (St Antoine) ..	LEMAIRE (A.)
Clinique urologique (Cochin)	N.
Embryologie	GIROUD (A.)
" (Prof. à titre personnel)	TUCHMANN-DUPLESSIS (H.)
Histoire de la médecine et de la chirurgie (Lariboisière)	SEZE (S. de)
Histologie	VERNE (J.)
Hygiène et clinique de la première enfance (Trousseau)	TURPIN (R.)
Hygiène et médecine préventive	JOANNON (P.)

Hygiène et médecine préventive	
(Prof. à titre personnel)	DEPARIS (M.)
Médecine du travail	DESOILLE (H.)
Médecine légale	PIEDELIEVRE (R.)
Microbiologie (Bactériologie et virologie)	FASQUELLE (R.)
Parasitologie	GALLIARD (H.)
" (Prof. à titre personnel)	BRUMPT (L.C.)
Pathologie chirurgicale	COUVELAIRE (R.)
" (Prof. à titre personnel)	LEURENCE (G.)
Pathologie exotique	LAVIER (G.)
Pathologie expérimentale et comparée	MERKLEN (F.P.)
Pathologie médicale	MILLIEZ (P.)
Pathologie respiratoire	TURIAF (F.)
Pathologie et thérapeutique générales	BOUDIN (G.)
Pharmacologie	UHEYMOL (J.)
" (Prof. à titre personnel)	LEVY (Mlle J.)
Physiologie	BINEL (L.)
" (Prof. à titre personnel)	BARGETON (D.)
" " "	PARROT (J.)
Physiologie et pathologie obstétricale	LEPAGE (F.)
Physique médicale	DOGNON (A.)
" " (Prof. à titre personnel)	DJOURNO (A.)
Radiologie médicale //	DESGRES (H.)
Technique chirurgicale et chirurgie expérimentale	LEGER (Lk)
Thérapeutiques	CONTE (M.)

II.- PROFESSEURS SANS CHAIRE, PROFESSEURS AGREGES ET MAITRES DE CONFERENCES - AGREGES.

MM.

Anatomie	CABROL (C.)
	COUINAUD (C.)
	OLIVIER (G.)
Anatomie patho- logique	GAUTHIER-VILLARS (Mlle P.)
	pr.s.ch.
	BUSSER (F.)
	GOUYGOU (Ch.)
	ORCEL (L.)
	PAILLAS (J.)
Anesthésiologie..	VOURC'H (G.)
Bactériologie ...	BARBIER (P.)
	CHRISTOL (D.)
	TOURNIER (P.)
Biochimie médicale	DESGRES (P.) pr.s.mh.
	POLONOSKI (J.) m.conf.
Biologie appliquée à l'Education physique et aux sports ...	PLAS (F.)

Carcinologie	DENOIX (P.)	
	MATHE (G.)	
Dermato syphiligraphie	DUPERRAT (B.)	
Electro radiologie	LEDOUX-LEBARD (G.)	
Hématologie	BILSKI-PASQUIER (G.)	
	DAUSSET (J.)	
Histologie	CO-JARD (R.) pr.s.zh.	
	MAROIS (M.)	
	RACADOT (J.)	
Hydrologie	CORNET (A.)	
Hygiène	BOYER (J.) pr.s.ch.	
	CORRE -HURST (M ^{me} L.)	
Maladies infectieuses	BASTIN (R.)	
	DUPONT (V.)	
Médecine légale	DEROBERT (L.) pr.s.ch.	
	FOURNIER (E.)	HADENGUE (A.)
	GHENIOT (M.)	
Médecine du travail	ALBAHARY (C.)	
Neurologie	LHERMITTE (F.)	
Obstétrique	GRANJON (A.)	
	HERVET (E.)	
	LE LORIER (G.)	
	MORIN (P.)	
	MUSSET (R.)	
	ROBEY (M.)	
	THOYER-ROZAT (J.)	
Ophthalmologie	BREGEAT (P.)	
	SARAUH (H.)	
Orthopédie	JUDET (R.)	
	RAMADIER (J.)	
Oto- Rhino-Laryngologie.....	DEBAIN (J.)	
Parasitologie	CHABAUD (A.)	
Pathologie chirurgicale	BARGAT (J.)	
	BINET (J.P.)	
	CAUCHOIX (J.)	
	CHATELIN (C.L.)	
	DUBOST (Ch.)	
	DUBOST (Gl.)	
	FAUREL (J.)	
	FLABEAU (F.)	
	GERMAIN (A.)	
	LOYGUE (J.)	
	MERCADIER (M.)	
	PERROTIN (J.)	
	ROBERT (H.)	
	THOMERET (G.)	
Pathologie exotique	SCHNEIDER (J.)	

III.- PROFESSEURS SANS CHAIRE ET AGREGES
CHARGES DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE
à titre permanent.

Anatomie DEBEYRE
Clinique chirurgicale ABULKER (P.)
AMELINE (A.) pr.s.ch.
HUGUIER (J.)
OLIVIER (C.)
PADOVANI (P.)
POILLEUX (F.)
ROUX (M.)
VERNE (J.M.)
Clinique médicale DOMART (A.)
PERRAULT (M.)
RAMBERT (P.)
THIEFFRY (S.)
Clinique obstétricale GRASSET (J.)
MAYER (M.)
RAVINA (J.)
Clinique ophtal-
mologique DESVIGNES (P.)
OFFRET (G.)
Clinique oto-rhino-
laryngologique .. MADURA (R.)
Clinique pédiatrique
et puériculture.. LAPLANE (R.)
CLINIQUE psychia-
trique BARUK (H.)
Clinique urologique. KUSS (B.)
Médecine légale GAULTIER

IV.- PROFESSEURS DETACHES
DANS LES UNIVERSITES ETRANGERES

Bactériologie HAUDUROY (P.) pt.s.ch.
Pathologie chirurgicale RUDLER (J.) Pr.s.ch.

V.- CHARGES DE COURS D'HYGIENE SCOLAIRE ET
UNIVERSITAIRE

BOLTANSKI (E.)
LAUNAY (C.)
Secrétaire général de la Faculté M.LENA (J.)
Secrétaires Mme BEURLAND (H.), Mlle CHAINTREUIL
Mme ROCHE (L.)
Conservateur en chef M. le Docteur HAHN (A.)
Conservateur Mlle DUMAITRE (P.)
Bibliothécaires Mmes CONTET (J.), FORGET (F.)
Mlles LAURENT (H.), L^e NOIR (G.)
QUIEVREUX (E.)

Pathologie expérimentale	CROSNIER (J.) HARTMANN (L.) LOEPER (J.) MAURICE (J.) RICHEL (G.)
Pathologie médicale	AUSSANNAIRE (M.) BOUR (H.) BOUVIER (J.) BOUVRAIN (Y.) BRICAIRE (H.) BRISAUD (H.) BROCARD (H.) BUGE (A.) CASTAIGNE (P.) m. conf. CATINAT (J.) CONTAMIN (F.) COURY (C.) FREZAL (J.) HOUSSET (E.) LAROCHÉ (Cl.) LESOBRE (R.) MACREZ (C.) NICK (J.) PEQUIGNOT (H.) pr. s. ch. ROYER (P.) WOLFROMM (R.)
Pédiatrie puériculture	JOSEPH (R.) MANDE (R.) MOZZICONACCI (P.) POLONOVSKII (C.) ROSSIER (A.)
Pharmacologie	BOISSIER (J.) LECHAT (P.)
Physiologie	DEJOURS (P.)
Physique médicale	GOUGEROT (L.) m. conf. pr. s. ch. KELLERSHOHN
Pneumo physiologie	KREIS (B.)
Psychiatrie	PICHOT (P.)
Psychiatrie infantile	DUCHÉ (D.)
Rhumatologie	DELBARRE (F.)
Stomatologie	CERNIA (P.) Chaput (Mme A.) m. c. agr. GRELLET (M.)
Thérapeutique	CHASSAGNE (P.) LAMOTTE (M.)
Urologie	QUENU (L.)

A MES PARENTS

A MA FEMME

A TOUS LES MIENS ET A MES AMIS.



A Monsieur A. DOGNON,

Professeur de physique médicale à la
Faculté de Médecine de Paris,

Membre de l'Académie de Médecine,

qui nous a accueilli avec bienveillance dans
son Laboratoire,

Hommage de Respectueuse Reconnaissance.

A notre Maître et Président de thèse,

Monsieur le Professeur Louis GOUGEROT,
Professeur à la Faculté de Médecine de
Paris,

qui nous a fait bénéficier de sa grande culture,
et enseigné avec patience la matière de cette
étude.

Hommage de profonde admiration.

: A Monsieur le Docteur F. GREMY, Professeur Agrégé,
qui nous a aidé de ses précieux conseils.

A mes Maîtres d'Externat,

M. le Docteur MOUCHET
M. le Professeur BARIET
M. le Professeur LELONG
M. le Docteur CLAISSE
M. le Professeur Agrégé THOMERET

A mes Maîtres d'Anesthésiologie,

M. le Professeur BAUMANN
M. le Professeur Agrégé VOURC'H
MM. les Docteurs A. DURANTEAU, R. NEDEY.

A mes autres Maîtres dans les Hopitaux,

MM. les Docteurs : M. MERCADIER
J. MARQUAND
M. CANEY
Ch. COURY
P. ALISON
D. ALAGILLE
J. VIALATTE
P. SATGE
Cl. DUBOST

A mon beau-frère, le Docteur P. CHOUBRAC, Médecin des
Hopitaux,

fidèle guide et ami.

INTRODUCTION

Le but de ce travail est de proposer un schéma électrique équivalent au larynx, et d'expliquer ainsi quel mécanisme préside à la variation d'impédance laryngée observée au cours de la phonation.

Cette variation d'impédance est révélée par la glottographie électrique, procédé dû à Ph. Fabre, pour suivre les mouvements de la glotte lors de la phonation (4). La glottographie permet une étude commode de la physiologie laryngée venant compléter les données fournies par observation directe par miroir et stroboscopie.

Son principe est le suivant : un courant alternatif de fréquence élevée, traverse la larynx de part en part à travers le plan cutané superficiel. Au cours de la phonation, le mouvement des cordes vocales vient moduler l'amplitude de ce courant.

Une fois amplifiée, détectée et filtrée de la composante HF, la différence de potentiel obtenue est envoyée sur un oscilloscope.

Le glottogramme est censé représenter l'image du mouvement des cordes vocales.

Cette technique ne s'intéresse donc qu'aux variations de module de l'impédance laryngée; Pour connaître le mécanisme en cause, la connaissance d'un seul paramètre est insuffisante il faut aussi étudier les variations de phase. C'est seulement lorsque l'on connaît les variations de ces deux paramètres : module et phase, que l'on peut tenter de donner, comme l'a fait J. Chanteur sans sa thèse pour le reflexe psycho-galvanique, une explication du mécanisme de la glottographie (2).

L'étude simultanée des variations de module et de phase constitue la partie originale de ce travail. Elle a été réalisée par la méthode du cercle pointé de L. Gougerot (1), un appareil à cercle pointé en HF a été spécialement réalisé pour ces mesures.

Les résultats de ces expériences nous ont conduits à formuler un certain nombre d'hypothèses, dont l'une nous semble pouvoir à la fois expliquer le mécanisme de la glottographie et justifier le schéma électrique équivalent au larynx que nous avons retenu.

Un schéma électrique équivalent doit pouvoir expliquer le comportement du tissu vis à vis de la tension électrique qui lui est appliquée.

Ce comportement ne dépend que de son impédance électrique. On peut dire en effet d'une façon très générale que l'impédance d'un système définit sa réponse à l'égard d'une sollicitation.

Dans l'exemple très simple de la loi d'Ohm en courant continu, la sollicitation (ou la cause) sera la tension V , la réponse (ou l'effet) sera le courant I , l'impédance sera la résistance ohmique pure du circuit R .

On conçoit donc que les raisonnements utilisés dans la conception d'un schéma électrique équivalent soient très proches de ceux que l'on fait dans l'étude des servo-mécanismes où l'on considère également une sollicitation et une réponse, l'une et l'autre étant liées par cette notion d'impédance ou ce qui revient au même par son inverse : l'admittance appelée, dans certains cas, transmittance.

Dans le cas de tensions, non plus continues, mais quelconques, ces grandeurs sont des opérateurs.

Ces opérateurs effectuent des transformations sur la grandeur d'entrée pour lui donner sa forme de réponse (grandeur de sortie). Ces opérateurs appelés encore parfois fonction de transfert, sont couramment utilisés dans l'étude des servo-mécanismes; Leur avantage énorme est de se prêter aux opérations linéaires, facilitant les calculs. On peut concevoir qu'il existe dans les mécanismes de régulation biologique l'analogie de ces fonctions de transfert rencontré en électro-technique. Certains auteurs² ont déjà établi en ce qui concerne la transformation dans un centre nerveux, d'un message en un message différent.

Les schémas électriques équivalents constituent donc une excellente introduction à l'étude de ces mécanismes d'auto-régulation.

En effet, un diagramme d'impédance en fonction de la fréquence se construit de la même façon que le diagramme de Niquist Cauchy dont l'examen permet de conclure sur le degré de stabilité d'un servo-mécanisme, et qu'il serait du reste possible d'obtenir directement sur l'écran d'un oscilloscope avec la méthode de cercle pointé.

Enfin ces schémas électriques équivalents, comme les machines analogiques, éclairent certains mécanismes physiologiques.

Pour ne citer qu'un exemple, nous donnerons celui du schéma électrique équivalent de la membrane, résistance shuntée par une capacité et dont la "constante de temps physiologique" est directement liée à la chronaxie, la vitesse de propagation de l'influx, la durée du potentiel d'action.

Avant de présenter l'ensemble de nos expériences relatives à l'impédance laryngée et leur interprétation, nous rappellerons rapidement quelques notions d'anatomie du larynx, et de physiologie de la phonation, nécessaires à la compréhension de la glottographie.

Ce chapitre sera suivi :

- d'une introduction à la mesure des impédances électriques biologiques
- d'une description de l'appareillage utilisé.
- de l'ensemble des faits expérimentaux
- de leur interprétation
- d'une conclusion.

RAPPEL ANATOMIQUE ET PHYSIOLOGIQUE

Configuration interne du larynx. ()

- Sur un schéma axial on reconnaît les cordes vocales inférieures limitant l'orifice glottique triangulaire à base postérieure.

Les cordes vocales inférieures, formation musculaire, sont limitées en dedans par le ligamentum vocale, tendu du thyroïde à l'apophyse vocale des aryténoïdes.

Les muscles laryngés sont classiquement divisés en deux groupes :

- l'un formé par le crico-aryténoïdien postérieur qui tire dans le sens de la flèche 1, est dilatateur de la glotte.

- l'autre groupe formé par tous les autres muscles qui sont stricteurs de la glotte. La plupart d'entre eux tirent dans le sens de la flèche 2. Parmi eux, le long du bord libre de la C.V. se trouve le thyro-aryténoïdien interne.

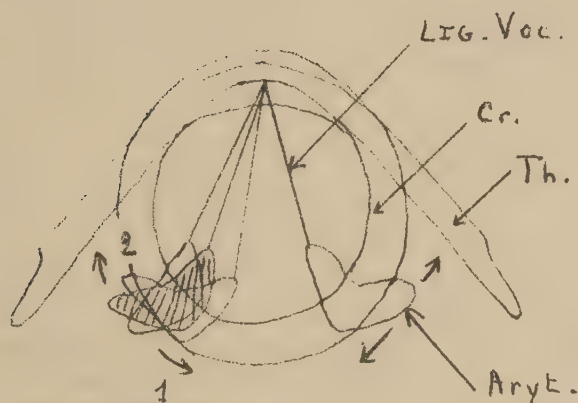


Fig. 1

Th : cartilage thyroïde
Cr : cartilage cricoïde
Aryt. : cartilage aryténoïde
Lig. Voc. : ligament vocal.

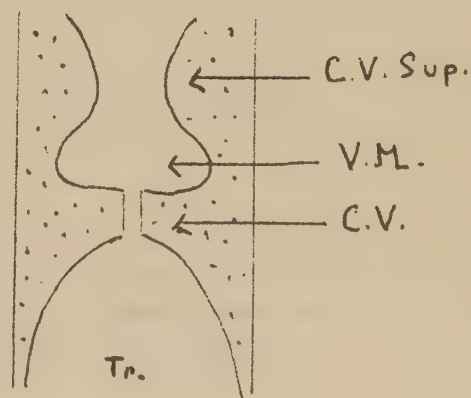


Fig. 2

C.V. : corde vocale
V.M. : ventricule de Morgagni
C.V. sup. : corde vocale supérieure
Tr : trachée.

- Sur une coupe frontale (Fig. 2), on voit les ventricules de Morgagni entre les C.V. inférieures (ou vraies C.V.) et les supérieures, formations membraneuses non musculaires qui n'ont qu'un rôle mineur, sinon nul dans la phonation.

Tous les muscles laryngés sont innervés par le récurrent ou nerf laryngé inférieur.

La physiologie de la phonation, longtemps obscure, a été complètement remaniée depuis la parution de la thèse de Mr. Husson (13).

Schématiquement, deux conceptions s'opposent :

- La théorie myoélastique due surtout à Ewald est la plus ancienne : les cordes vocales vibrent passivement comme des anches sous l'action du courant d'air pulmonaire, la genèse des vibrations serait due à un conflit entre la pression sous glottique (force d'écartement) et la tension des cordes vocales (force de rappel) qui n'ont donc qu'un rôle tonique.

- Dans la théorie Neuro-chronaxique - thèse de Husson (1950) - la vibration des cordes vocales n'est plus un phénomène passif, mais actif, d'origine nerveuse. Leur mouvement est une suite de contractions rythmées, commandées directement par les influx du nerf récurrent, et se produisant au rythme même de ces influx.

Cette hypothèse admet donc en plus des deux fonctions laryngées d'adduction et de dilatation glottiques, une fonction vibratoire localisée dans le thyro-aryténoïdien interne qui répondrait coup pour coup aux stimulations récurrentielles. (14 - 16)

Cette théorie qui est de plus en plus admise, repose sur un grand nombre d'expériences qu'il n'est pas dans notre propos de décrire ici.

Nous rappellerons qu'il est plus commode d'étudier la voix chantée que la voix parlée. La voix parlée est complexe, faite de voyelles, sons périodiques mais dont la fréquence varie sans cesse au cours de la parole, et de consonnes, les unes dites sourdes (ce sont des phénomènes apériodiques), les autres consonnes sonores sont à la fois périodiques et apériodiques. (6)

La voix chantée est moins complexe, car on ne tient les notes que sur des voyelles; le son chanté a des qualités bien définies, en particulier une hauteur constante et non plus sans cesse variable comme dans le langage parlé.

Enfin, la voix chantée comprend au moins deux registres : le plus grave ou voix de poitrine utilisé par les hommes, et le deuxième registre plus aigu qui constitue la voix de fausset pour l'homme, la voix de tête pour la femme.

Le premier registre aurait sa fréquence maxima limitée par le nombre d'influx que le récurrent peut transmettre en une seconde.

Les registres supérieurs sont expliqués par un mécanisme de polyphasage identique à celui de la "volley theory" appliquée par Wever au nerf auditif.

Deux faits très importants doivent être dégagés : le premier est la vibration des cordes vocales dans un plan horizontal à la fréquence du son émis.

Le second fait concerne les modifications subies par les cordes lorsque le chanteur passe, en gardant la même hauteur, du registre de poitrine à la voix de fausset.

Dans le premier cas, les cordes sont trappues, épaisses avec un accolement profond (jusqu'à 1 cm parfois).

Dans la voix de fausset, elles sont moins tendues, triangulaires, à bord fin et ne se rejoignent pas durant la période vibratoire.

Si la glotte s'ouvre et se ferme périodiquement dans la voix de poitrine, elle reste constamment ouverte dans la voix de fausset.

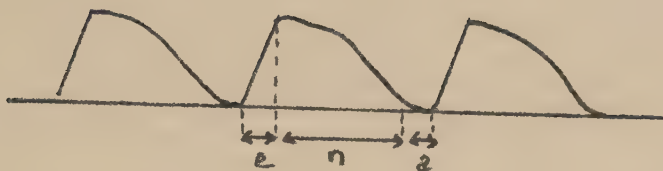
En résumé : Le larynx est à l'origine des sons périodiques.

- la fréquence du son est celle de la vibration des C.V.
- l'intensité dépend essentiellement de la pression sous-glottique.
- le timbre ^{extra-vocal} dépend essentiellement du tonus des cordes vocales.

La glottographie permet de suivre facilement les mouvements des cordes vocales au cours du temps.

La montée rapide du tracé correspondra à l'ouverture glottique (e), la descente à la fermeture (r).

Pour une intensité forte apparaît un plateau inférieur qui correspond à la période de fermeture par accolement des cordes (a). Celui-ci est d'autant plus long que l'intensité sonore est plus grande pouvant aller jusqu'à 55 % de la période.



é : durée de la phase d'écartement des cordes vocales
 r : phase de rapprochement
 a : phase d'accolement.

Fig. 3.

Les premiers glottogrammes en voix de fausset étaient très différents de ceux obtenus en voix de poitrine; si l'on veut que l'image glottographique soit le plus fidèle reflet possible de la modulation de tension par le mouvement des cordes vocales, il convient que la bande passante soit suffisamment large pour conserver l'amplitude d'un nombre suffisant d'harmoniques, et il importe également de conserver les relations de phase existant entre ceux-ci.

La distorsion de phase déforme en effet considérablement une fonction de temps.

Une autre difficulté de l'enregistrement de la voix de fausset, est qu'il exige une sensibilité plus grande.

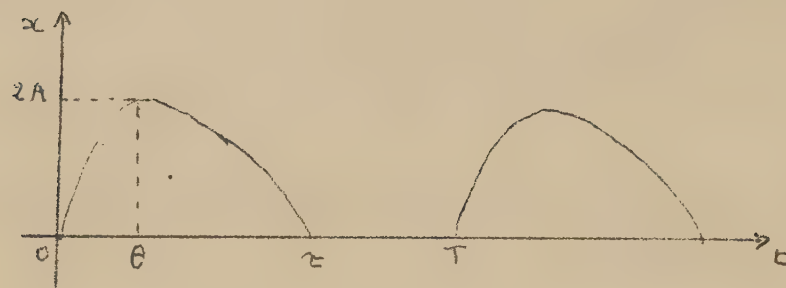
Ces conditions ont été réalisées par L. Gougerot, F. Grémy et N. Marstal (9). On constate alors l'analogie du glottogramme en voix de poitrine et voix de fausset, permettant une interprétation identique.

La montée correspond à l'écartement des cordes et à l'élargissement de la fente glottique.

La descente peut être considérée comme l'image du rapprochement des cordes.

Le caractère commun à tous les tracés, est la brusquerie de l'ouverture qui est marquée par un angle toujours vif et qui suggère un mécanisme percussif.

La cinématique des cordes vocales peut se résumer sur un graphique dont l'allure est retrouvée sur le glottogramme (7').



Ouverture glottique en fonction du temps.

T : période

τ : durée de la phase d'ouverture $\tau = qT$.

q : quotient d'ouverture

$\theta = \alpha \tau$ durée de la phase d'écartement des cordes vocales.
 A : écartement maximum de la corde vocale à partir de la position de repos.

$2A$ représentent donc l'ouverture maximum de la glotte.

Fig. 4.

INTRODUCTION A LA MESURE DES IMPEDANCES ELECTRIQUES BIOLOGIQUES

On peut déterminer l'impédance électrique d'un système de deux façons.

- Soit par l'étude de l'impédance en courant sinusoïdal elle aboutit à la construction de diagrammes d'impédance. Cette méthode bénéficie des avantages du régime permanent, de la plus grande facilité d'amplification, de la précision des mesures par les méthodes de pont.

Elle est pratiquement la seule possible quand on étudie une variation d'impédance.

- Soit par l'étude du régime transitoire après application d'un échelon rectangulaire, méthode utilisée en particulier dans l'étude du nerf assimilé à un conducteur à noyau.

Ces deux méthodes doivent aboutir au même résultat, puisque un échelon rectangulaire peut être décomposé en son spectre de Fourier. L'étude de l'impédance en courant sinusoïdal pour une gamme étendue de fréquences, réalise physiquement cette décomposition de la réponse, au lieu de la réaliser mathématiquement (42).

Etude de l'impédance en courant sinusoïdal.

La résistance électrique d'un tissu vivant n'est pas purement ohmique. Il s'agit d'impédance, grandeur définie par son module et son argument dont l'étude est grandement facilitée par la notation imaginaire.

Rappel de la notation complexe.

On sait qu'un vecteur est un segment de droite orienté défini par son origine, son support, sa longueur, son sens.

Le vecteur $\overrightarrow{OA}$ conventionnellement positif, aura pour longueur $+a$, alors que le vecteur $\overrightarrow{OB}$ qui a le sens inverse sera considéré comme négatif et sera représenté par la grandeur algébrique $-a$.

Pour passer de l'un à l'autre, il suffit de faire tourner le premier de 180° , ou ce qui revient au même de le multiplier par -1 .

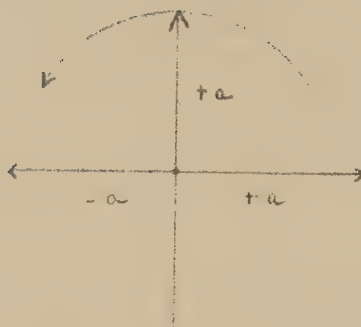


Fig. 5.

Si à cette rotation de 180° correspond la multiplication du module par -1 , on peut imaginer qu'à une rotation de 90° correspondra la multiplication par un opérateur que l'on appellera j ; On conviendra qu'à la rotation de 90° dans le sens trigonométrique correspondra la multiplication par $+j$ et $-j$ dans le sens contraire.

Faire tourner le vecteur $+a$ deux fois de suite de 90° dans le même sens, revient donc à le multiplier par -1 , ou deux fois par j , d'où l'égalité :

$$+j^2 = -1$$

$$j = \sqrt{-1}$$

j étant le symbole imaginaire. Les mathématiciens l'appellent i , en électrotechnique il est habituel de l'appeler plutôt j pour éviter les confusions avec l'intensité de courant.

Un vecteur qui n'est ni horizontal, ni vertical $\overline{OM}$ pourra toujours être considéré comme la somme géométrique de deux vecteurs, l'un porté sur l'axe des X , l'autre porté sur l'axe des Y .

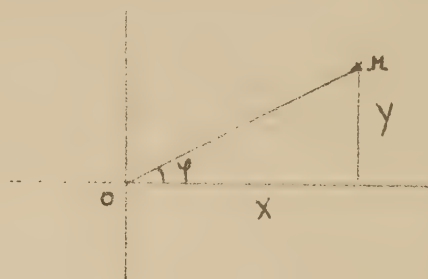


Fig. 6.

On le représentera par :

$$\overline{OM} = X + jY$$

Ce sera la représentation imaginaire du vecteur $\overline{OM}$ dont le module aura pour longueur $\sqrt{X^2 + Y^2}$; l'argument sera donné par $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Y}{X}$; l'extrémité du vecteur $\overline{OM}$ est appelée affixe.

Si l'on appelle r la longueur de ce vecteur :

$$X = r \cos \varphi \qquad Y = r \sin \varphi$$

La deuxième façon d'écrire l'expression imaginaire du vecteur $\overline{OM}$ est donc :

$$\overline{OM} = r (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

Enfin, comme il est possible de démontrer par un développement en série que :

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$
$$e^{-j\varphi} = \cos \varphi - j \sin \varphi$$

On voit qu'il existe une 3ème façon d'écrire l'expression imaginaire d'un vecteur :

$$\overline{OM} = r \cdot e^{j\varphi} \qquad \begin{array}{l} \text{où } r \text{ est le module} \\ \varphi \text{ l'argument} \\ e \text{ la base des Log;Népériens.} \end{array}$$

Moyennant la convention précédente $j^2 = -1$, les règles du calcul algébrique peuvent être étendues aux nombres imaginaires.

- Pour additionner ou soustraire deux expressions imaginaires, il suffit de considérer isolément terme réel et terme imaginaire.
- Le produit de deux expressions imaginaires est encore une imaginaire dont le module est le produit des modules et le décalage ou argument la somme algébrique des arguments.

- Le quotient de deux expressions imaginaires est une expression imaginaire. Le module du quotient est égal au quotient des modules et le décalage égal à la différence des deux décalages (en tenant compte de leur signe).

- Quantité conjuguée d'une imaginaire.

$$\text{Si } I_1 = a + jb \quad \text{avec } \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$$

$I_2 = a - jb$ sera la quantité conjuguée de la précédente avec $\operatorname{tg} \varphi = -\frac{b}{a}$

La somme de deux expressions imaginaires conjuguées est un nombre réel.

Le produit de deux imaginaires conjuguées est également un nombre réel :

$$(a + jb)(a - jb) = a^2 + b^2$$

- L'inverse d'une expression imaginaire est une expression imaginaire. Son module est l'inverse du module, le décalage est le même mais change de signe.

$$I_1 = a + jb \quad \text{avec} \quad |I_1| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b}{a}$$

$$\text{Soit } I_2 = \frac{1}{a + jb}$$

multiplions haut et bas par l'imaginaire conjuguée $a - jb$.

$$I_2 = \frac{a - jb}{a^2 + b^2} = \frac{a}{a^2 + b^2} - j \frac{b}{a^2 + b^2}$$

$$\text{Module de } |I_2| = \sqrt{\frac{a^2}{(a^2 + b^2)^2} + \frac{b^2}{(a^2 + b^2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{b}{a}$$

$$\text{donc } |I_2| = \frac{1}{|I_1|}$$

$$\varphi_1 = -\varphi_2$$

Les règles précédentes permettent de comprendre qu'à l'identité de deux expressions imaginaires correspondent donc deux égalités **concernant** le module et l'argument.

$$\text{Si } \bar{A} = \frac{\bar{B} \cdot \bar{C}}{\bar{D}}$$

On aura :

; Argument de A = Arg. de B + Arg. de C - Arg. de D

$$\text{Si } \bar{A} = -\frac{\bar{B} \cdot \bar{C}}{\bar{D}}$$

$$\text{Arg. de A} = \text{Arg. de } -1 + \text{Arg. de B} + \text{Arg. de C} - \text{Arg. de D}$$

$$\text{Arg. de A} = \pi + \text{Arg. de B} + \text{Arg. de C} - \text{Arg. de D}$$

puisque Arg. -1 est π

Enfin sont constamment utilisées les relations :

$$\frac{1}{j} = -j$$

$$j^2 = -1$$

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} = j \quad \begin{array}{l} \text{L'argument de } j \\ \text{est donc : } \frac{\pi}{2} \end{array}$$

$$j^m = e^{jm\frac{\pi}{2}} = e^{j\alpha} \quad \text{en posant } \alpha = m \frac{\pi}{2}$$

Notation imaginaire du courant alternatif.

Soit une grandeur périodique sinusoïdale, par exemple une tension de la forme : $v = V_0 \cdot \cos (\omega t + \varphi)$

On conviendra d'appeler représentation imaginaire de cette fonction, l'expression imaginaire dont v est la partie réelle.

$$\bar{v} = V_0 \cos (\omega t + \varphi) + j V_0 \sin (\omega t + \varphi) = V_0 \cdot e^{j (\omega t + \varphi)}$$

Par ailleurs, en vertu de la propriété des exposants :

$$\bar{v} = V_0 e^{j (\omega t + \varphi)} = V_0 e^{j \omega t} \cdot e^{j \varphi}$$

Le vecteur $\bar{V} = V_0 \cdot e^{j \varphi}$ est représenté par un vecteur constant de longueur V_0 et faisant un angle φ avec l'axe des X.

Le vecteur $\bar{v} = V_0 \cdot e^{j (\omega t + \varphi)}$ est représenté par le vecteur précédent $\bar{V}$ tournant avec la vitesse angulaire uniforme ω .

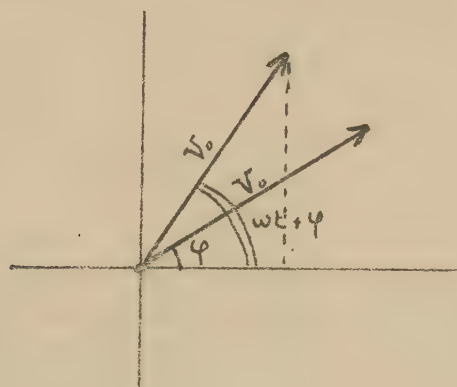


Fig. 7.

On voit donc que dans cette représentation, la tension instantanée $v = V_0 \cos (\omega t + \varphi)$ est à chaque instant la projection du vecteur $\bar{V}$ sur l'axe des X.

On sait qu'en courant sinusoïdal toutes les équations qui lient les grandeurs électriques, pour des circuits passifs comprenant résistance, self, capacité, sont des équations différentielles linéaires.

La relation par exemple, liant la tension et le courant pour une capacité est :

$$i = - C \frac{dV}{dt}$$

pour une self :

$$v = L \frac{di}{dt}$$

Dans la représentation imaginaire, ces relations deviennent si l'on prend la tension pour origine des phases :

- dans le cas du condensateur :

$$v = V_0 \cos \omega t$$

$$\bar{v} = V_0 e^{j\omega t}$$

$$i = C\omega V_0 \sin \omega t$$

$$\bar{i} = jC\omega V_0 e^{j\omega t} = jC\omega \bar{v}$$

- dans le cas de la self :

$$i = \frac{1}{L} \int v dt$$

$$\bar{i} = \frac{1}{jL\omega} \cdot V_0 e^{j\omega t} = \frac{\bar{v}}{jL\omega}$$

Ces deux exemples montrent que la loi d'ohm est vérifiée pour les expressions imaginaires des courants et des tensions, à condition de considérer une grandeur complexe ayant les dimensions d'une résistance que l'on appellera impédance imaginaire et qui sera le rapport de la tension par le courant

soit $\frac{1}{jC\omega}$ pour la capacité

$jL\omega$ pour la self.

On peut montrer que ceci est tout à fait général, que les lois de Kirchhoff s'appliquent à des réseaux quelconques à condition de prendre pour impédance d'une self et d'une capacité, les expressions précédentes.

Quant à l'impédance d'une résistance ohmique, elle ne dépend pas de la fréquence et reste cette résistance elle-même.

Ainsi dans le cas d'une résistance, l'impédance est purement réelle.

Dans le cas d'une self ou d'un condensateur, l'impédance est purement imaginaire.

Dans un cas quelconque Z est un nombre complexe quelconque de la forme :

$$Z = Z_0 e^{j\varphi} = X + jY = Z_0 \cos \varphi + j Z_0 \sin \varphi$$

Apparaissant ainsi comme la somme vectorielle de deux vecteurs perpendiculaires :

- l'un $X = Z_0 \cos \varphi$ est le terme réel ou résistif
- l'autre $Y = jZ_0 \sin \varphi$ est le terme imaginaire ou réactif.

Ces deux termes sont portés sur les axes correspondants.

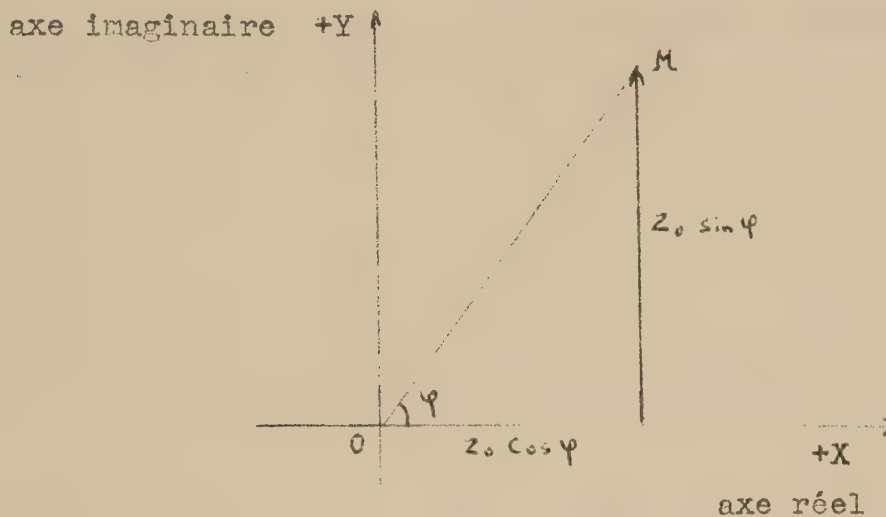


Fig. 8.

Admittance imaginaire : c'est l'inverse de l'impédance imaginaire.

Lieu d'impédance dans le plan complexe.

Les coordonnées de M sont $X = Z_0 \cos \varphi$

et $Y = Z_0 \sin \varphi$

avec $Z = X + jY$

L'impédance Z est fonction de la pulsation ω de la sollicitation sinusoïdale qui lui est appliquée.

L'affixe décrit donc une courbe lorsque ω et par conséquent la fréquence N varient. C'est le lieu d'impédance en fonction de la fréquence. ($\omega = 2\pi N$)

Une capacité en série avec une résistance



aura pour expression imaginaire $Z = R + \frac{1}{jC\omega} = R - \frac{j}{C\omega}$

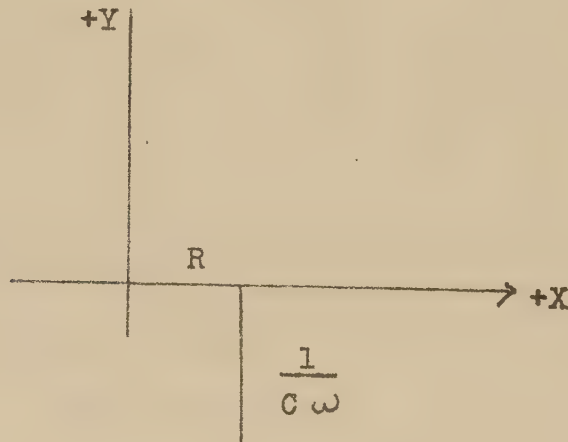
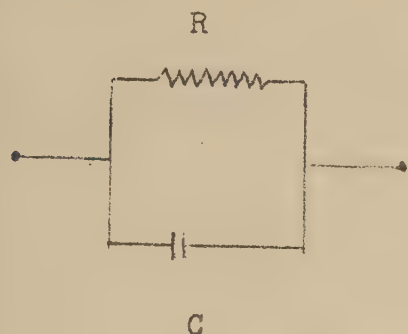


Fig. 9.

Si laissant la fréquence fixe on fait varier C , on aura le même lieu d'impédance en fonction de C .

On pourra tracer le diagramme ou lieu d'impédance dans le plan complexe en portant pour chaque fréquence, en abscisse la partie réelle ou résistive X de l'impédance complexe, en ordonnée la partie imaginaire ou réactive Y de celle-ci.

Dans tous les cas où interviennent les circuits parallèles, il est plus intéressant de dresser le diagramme d'admittance en traçant dans le plan complexe le lieu de $\frac{1}{Z}$, puisque l'admittance totale est la somme des admittances partielles en parallèle.



$$Z_c = -j \frac{1}{C \omega} = \frac{1}{jC \omega}$$

$$\frac{1}{Z_c} = jC \omega$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + jC \omega$$

C'est ainsi que le lieu d'admittance de $\frac{1}{Z}$ est une droite parallèle à l'axe des Y , menée au point d'abscisse $\frac{1}{R}$.

Le lieu de Z s'obtient par inversion graphique en choisissant l'origine comme pôle d'inversion.

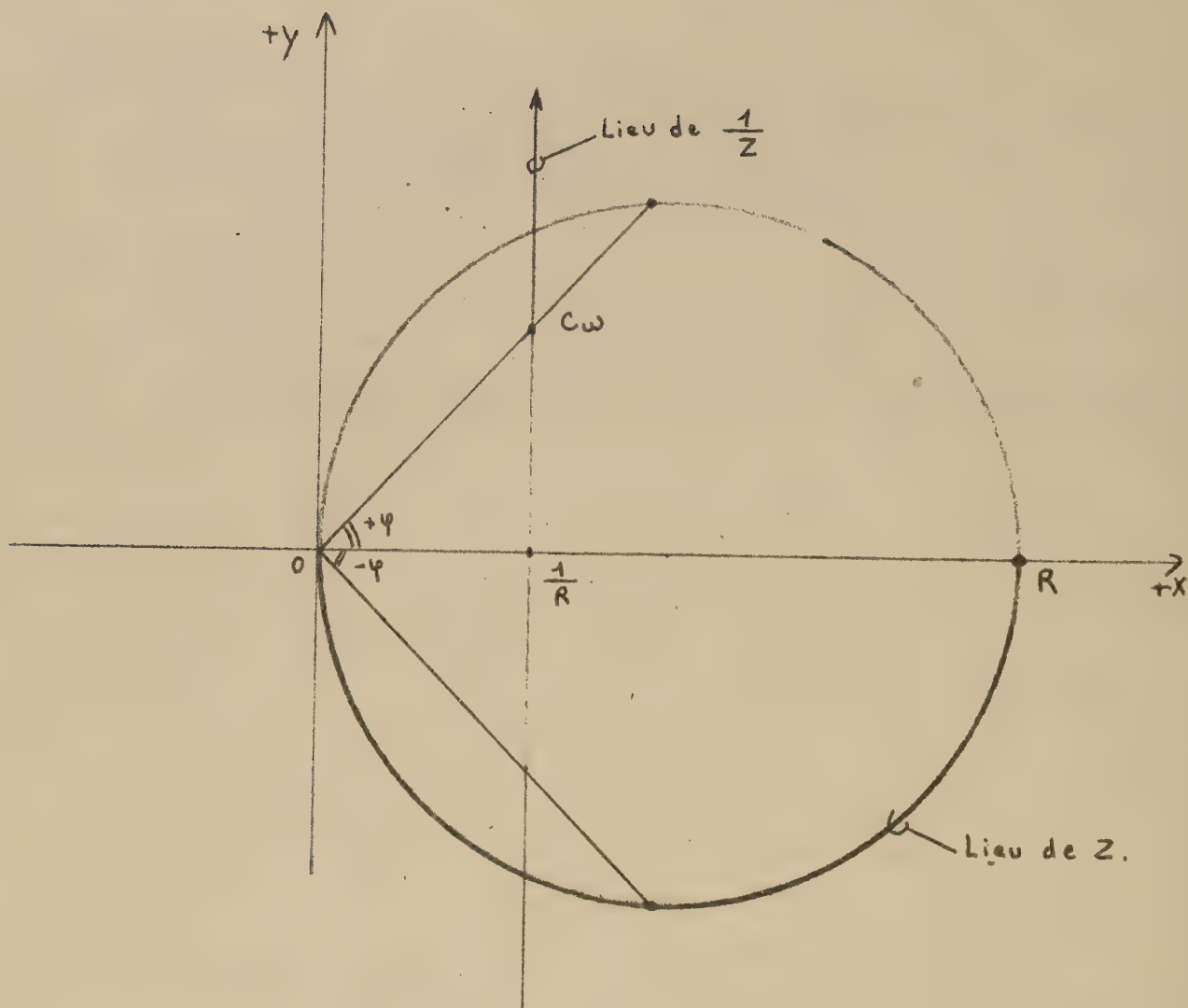


Fig. 10.

La figure inverse de cette droite est un cercle passant par l'origine centré sur la perpendiculaire abaissée du pôle d'inversion sur la droite (donc ici centré sur l'axe réel).

Le lieu d'impédance sera en fait la moitié de ce cercle sous-jacente à l'axe de X. En effet, il est facile de montrer que pour passer du lieu d'admittance au lieu d'impédance il faut faire une inversion graphique suivie d'une symétrie.

Si $\bar{A}$ est une admittance complexe de la forme $A = A_0 e^{j\psi}$

L'impédance $\bar{Z} = \frac{1}{A} = \frac{1}{A_0 e^{j\psi}} = \frac{1}{A_0} \cdot e^{-j\psi}$ a bien pour

module l'inverse du module de l'admittance, et pour argument le même en valeur absolue, mais changé de signe, ce qui explique le retournement. On retiendra donc que l'argument de l'admittance ou de l'impédance est le même au signe près (10).

Si le modèle comporte une résistance ohmique r en série, le lieu d'impédance précédent subira simplement une translation de valeur r le long de l'axe réel.

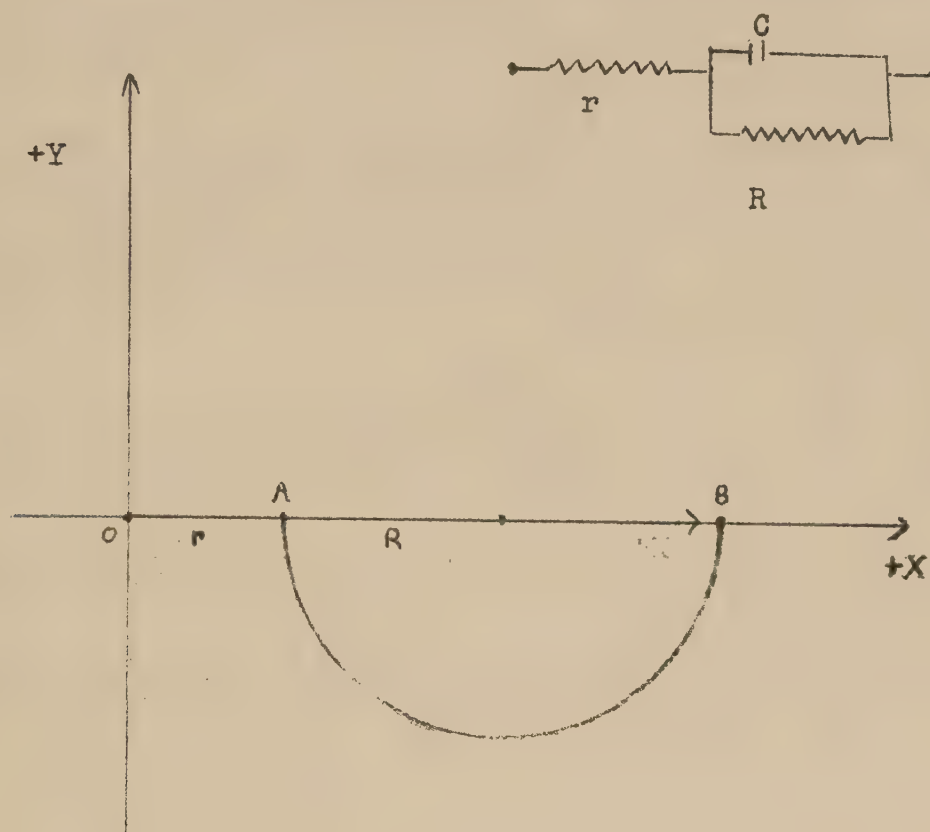


Fig. 11.

- pour une fréquence infinie $\omega = 2\pi N = \infty$ le condensateur joue le rôle d'un court-circuit, l'affixe est en A, la valeur du module de l'impédance est r.

- pour une fréquence nulle $|z| = r + R$

- dans ces deux cas extrêmes, l'argument est nul.

Ainsi dans le cas où un nombre suffisant de points expérimentaux s'alignent sur un cercle, on peut dans le cas de ce modèle déduire la valeur de r et de R par l'extrapolation à fréquence nulle et infinie.

LES DEUX PRINCIPAUX SCHEMAS BIOLOGIQUES.

Le modèle précédent est le premier schéma électrique proposé aussi bien pour représenter des tissus déjà complexes que des éléments cellulaires.

Il est convenu de l'appeler modèle de Philipppson. La portion comprenant R et C en parallèle serait la représentation la plus schématique de la membrane cellulaire. Le produit RC est la constante de temps de cette membrane. La portion résistive pure r en série correspondrait à la résistance des électrodes et du milieu électrolytique interposé de part et d'autre de la membrane.

Modèle de Philipppson Cole.

Si le relevé expérimental du lieu d'impédance de diverses membranes cellulaires s'aligne assez bien sur un arc de cercle, on constate cependant que cet arc n'est pas centré sur l'axe réel mais au dessus.

On peut expliquer ce fait en remplaçant dans le schéma précédent la capacité statique pure par une capacité appelée capacité de polarisation.

Fricke a montré que : du point de vue formel, l'impédance d'une telle capacité de polarisation pouvait être représentée par la quantité imaginaire.

$$Z_{cp} = \frac{1}{Y(j\omega)^m}$$

dans laquelle Y est une quantité constante
m un nombre inférieur à 1.

Si on appelle z l'impédance d'une capacité de polarisation shuntée par une résistance ohmique R, on aura :

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R} + Y(j\omega)^m$$

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R} + \gamma \omega^m j^m$$

On a vu que $j^m = e^{jm \frac{\pi}{2}} = e^{j\alpha}$ en posant $\alpha = m \frac{\pi}{2}$

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R} + \gamma \omega^m e^{j\alpha} = \frac{1}{R} + \gamma \omega^m \cos \alpha + j \gamma \omega^m \sin \alpha$$

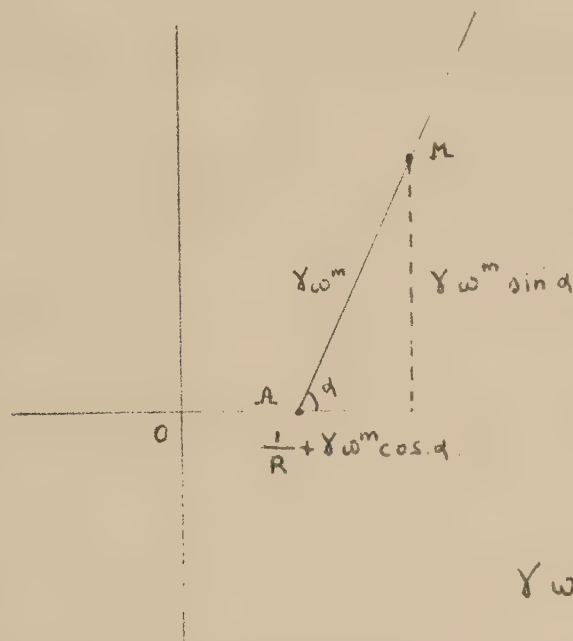
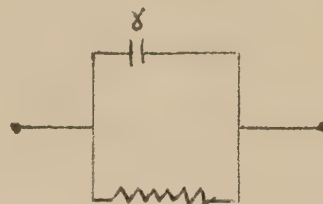
partie réelle

partie imaginaire

En portant donc $\frac{1}{R} + \gamma \omega^m \cos \alpha$ sur l'axe réel

$\gamma \omega^m \sin \alpha$ sur l'axe imaginaire

on obtient pour lieu d'admittance $\frac{1}{z}$ une droite, mais qui cette fois-ci est inclinée d'un angle α sur l'axe réel, et qui coupe cet axe au point d'abscisse $\frac{1}{R}$



$\gamma \omega^m$ est la longueur du segment AM.

Fig. 12.

Le lieu d'impédance sera déduit du lieu d'admittance par une inversion géométrique suivie d'une symétrie.

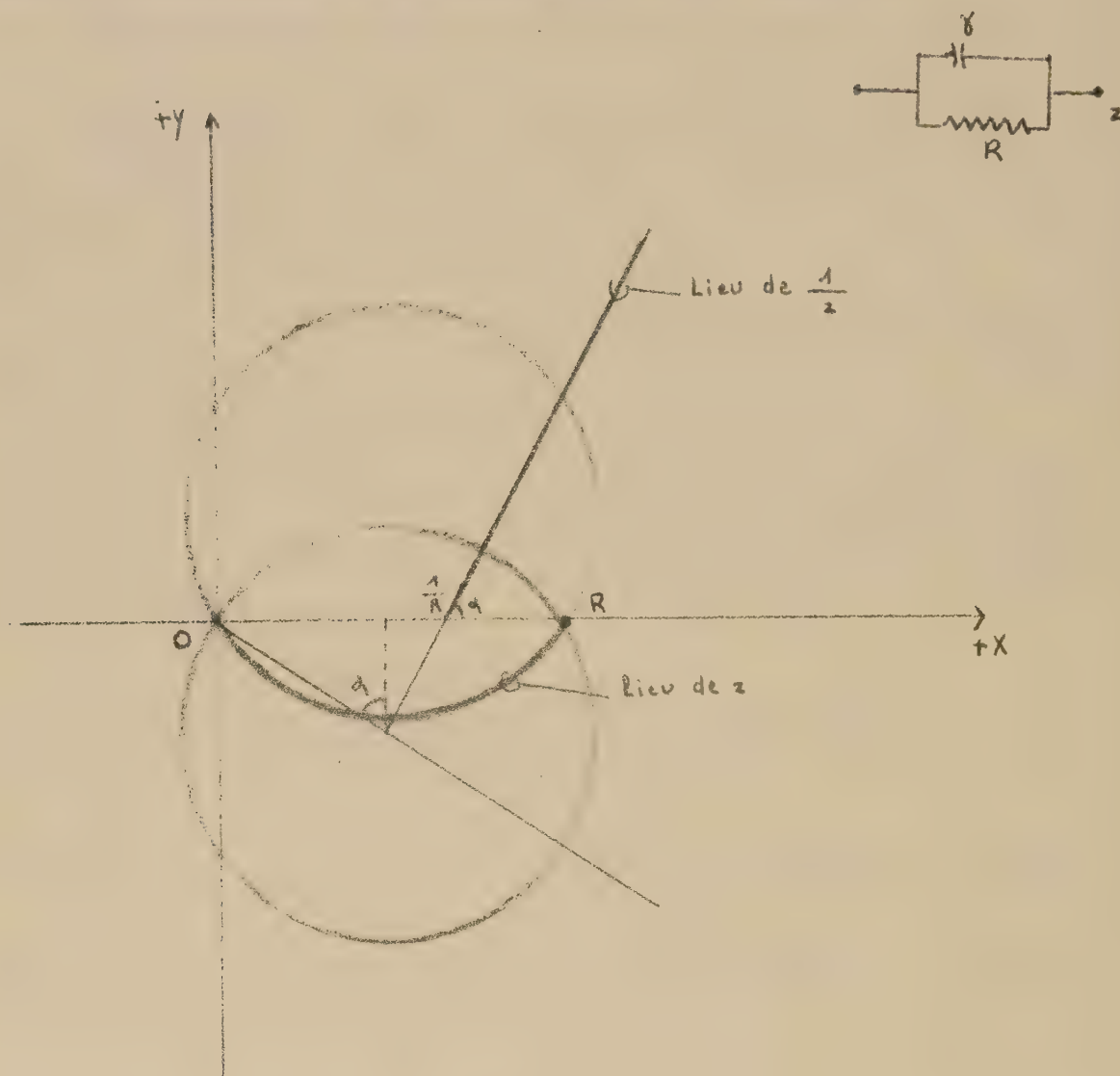


Fig. 13

Le lieu d'impédance est donc un arc de cercle d'angle au centre 2α .

La présence d'une résistance série r décale le diagramme d'une valeur r sur l'axe réel.

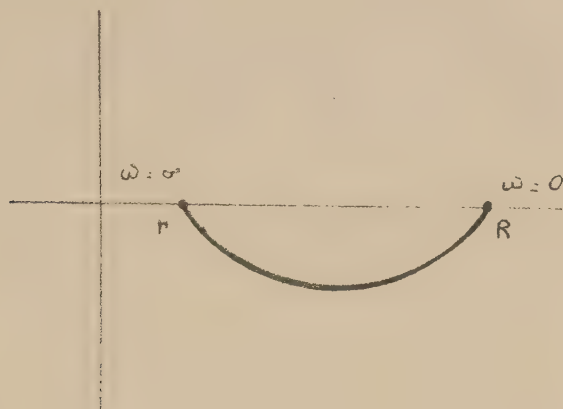


Fig. 14.

Remarques concernant la capacité de polarisation.

1- Les unités.

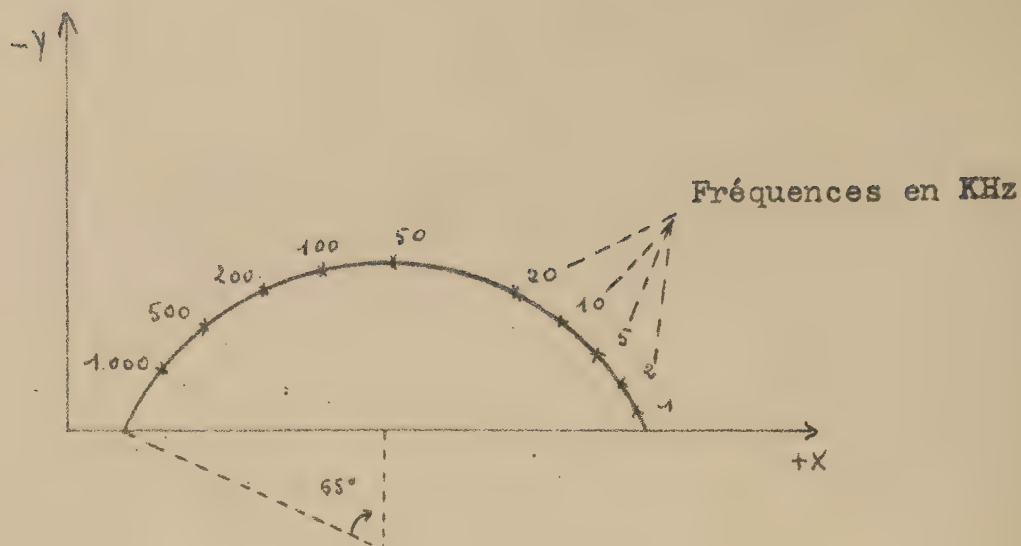
On ne peut parler ici de microfarads, car $\frac{1}{\gamma \omega^m}$ a les dimensions d'une résistance, et ω les dimensions de l'inverse d'un temps. Comme pour une capacité statique $\frac{1}{C \omega}$ a les dimensions d'une résistance, la capacité γ de polarisation a les dimensions de C multiplié par T^{m-1} .

2- La capacitance $\frac{1}{\gamma \omega^m}$ d'une capacité de polarisation pourrait être considérée comme due à l'association d'une capacité statique et d'une capacité de diffusion. (ou de Warburg)

L'admittance d'une capacité de diffusion est proportionnelle à : $(j\omega)^{\frac{1}{2}}$, son angle de phase est donc de 45° . On peut montrer qu'en mettant en série ou en parallèle une capacité de diffusion de Warburg dont l'impédance est $\frac{1}{\gamma(j\omega)^{\frac{1}{2}}}$

et une capacité statique $\frac{1}{C(j\omega)}$ on obtient dans des limites

assez larges de fréquences un système global qui obéit assez bien à la relation de Fricke avec une valeur α intermédiaire entre 45° et 90° .



EXEMPLE -

Lieu d'impédance d'un axone géant de Calmar.

Fig. 15.

Modèle de Fricke.

Nous appellerons ainsi le modèle constitué par une branche comprenant résistance et capacité en série, en parallèle avec une branche résistive R.

Nous préciserons chaque fois si la capacité est du type statique ou du type de polarisation.

Lieu d'impédance du modèle de Fricke avec capacité statique.

-1 Le lieu d'impédance de la branche capacitive est une droite.

$$z = r - j \frac{1}{C \omega}$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{1}{r C \omega}$$

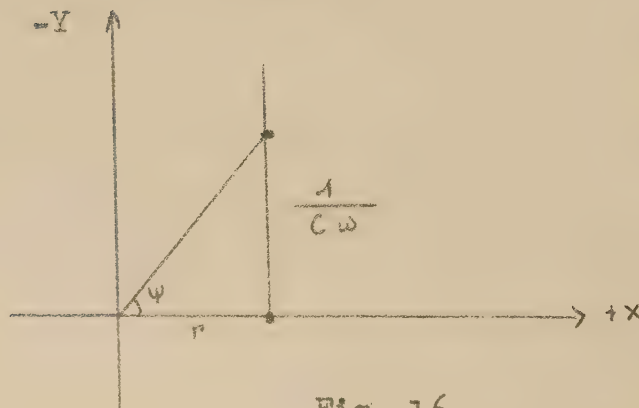
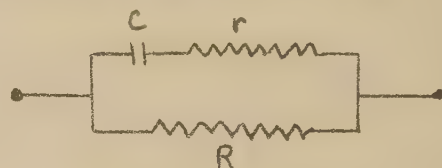


Fig. 16.

Nous porterons maintenant suivant la convention habituelle de Cole, les réactances capacitives (négatives) vers le haut.

2- Le lieu d'admittance de cette branche capacitive sera donc un cercle passant par le pôle d'inversion centré sur l'axe réel suivi d'une symétrie.

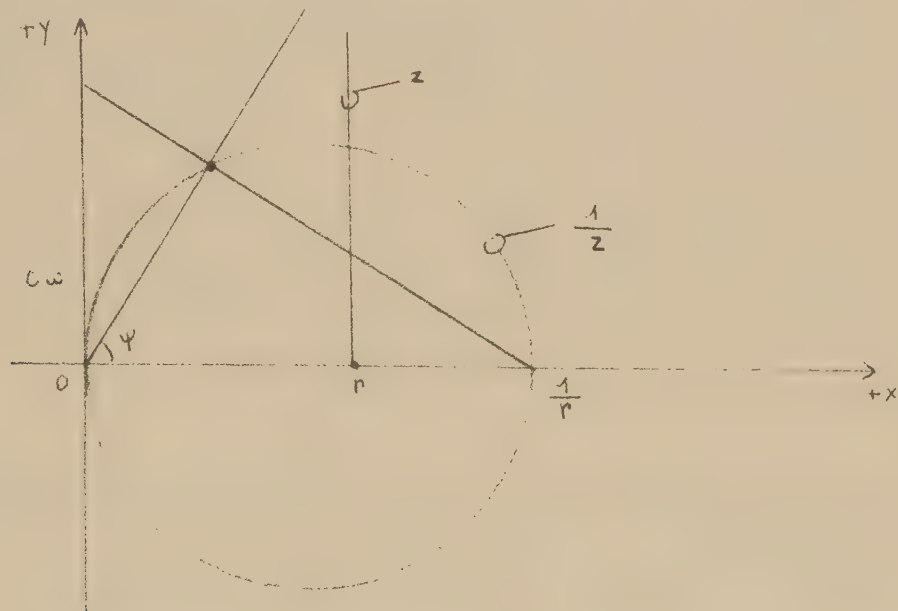


Fig. 17.

3- Le lieu d'admittance de l'ensemble du modèle sera :

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{z}$$

donc cercle précédent ayant $\frac{1}{R}$ pour diamètre et décalé de $\frac{1}{R}$ par rapport à l'origine.

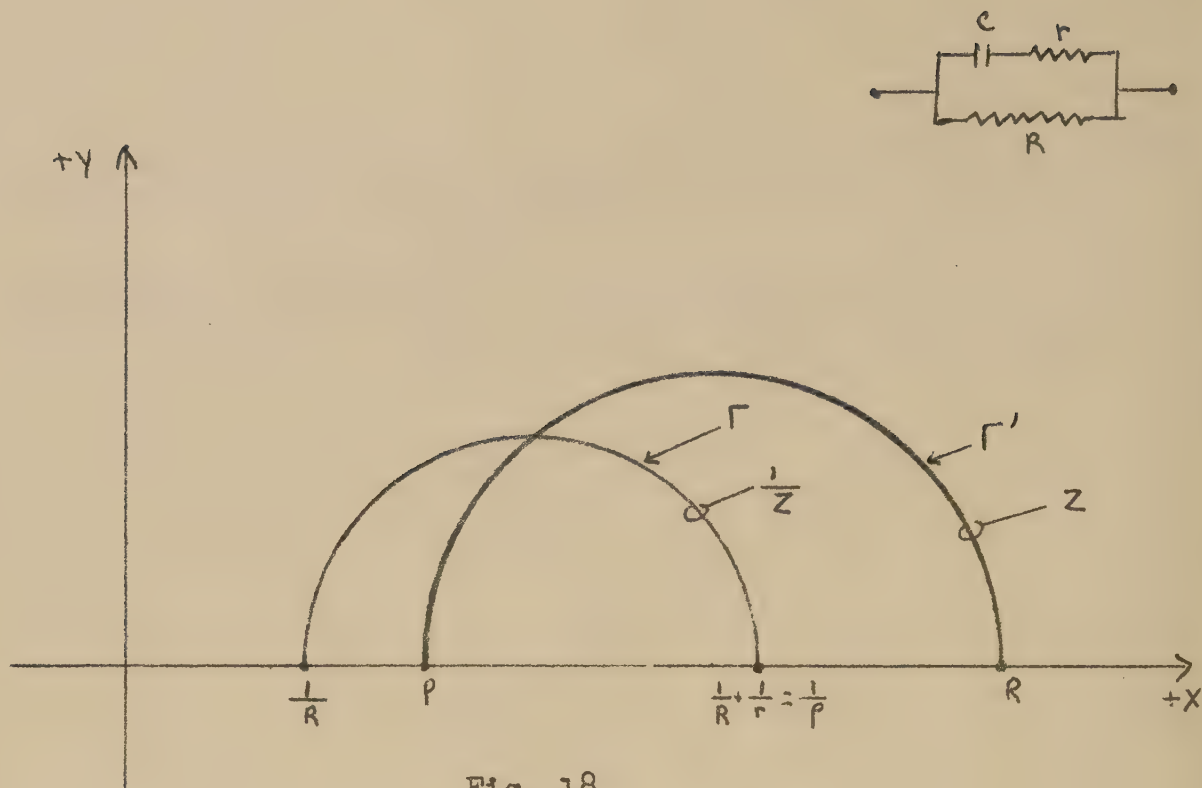


Fig. 18.

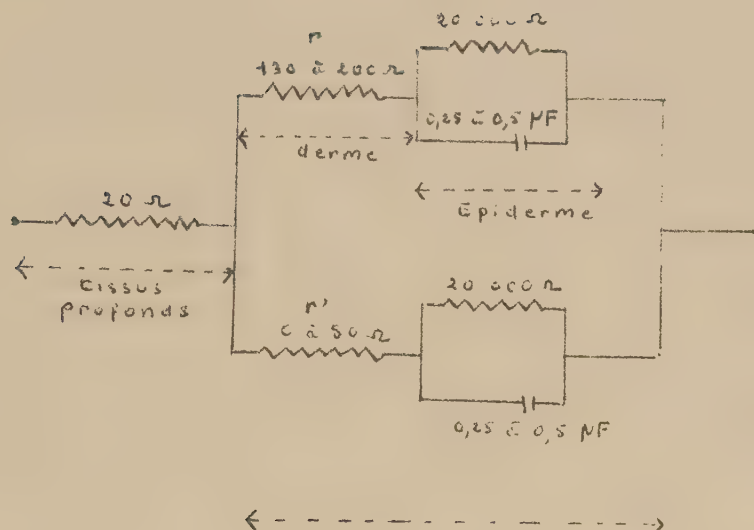
4- Pour avoir le lieu d'impédance Z , il faut prendre l'inverse de ce cercle Γ . Ce sera un autre cercle Γ' .

Modèle de Fricke avec capacité de polarisation.

Le lieu d'impédance obtenu par une construction analogue serait un arc de cercle.

En conclusion, on voit qu'un lieu d'impédance ayant l'allure d'un arc de cercle peut être interprété soit comme un modèle de Philippon, soit comme un modèle de Fricke.

C'est à ces deux schémas principaux que l'on fait constamment appel pour reconstituer le schéma électrique équivalent d'un tissu, jouant sur la valeur de leurs paramètres, ou sur leur association comme dans l'exemple du modèle de Strohl, constitué par deux Philippon en parallèle.



Circuit glandulaire couplant
la peau aux plans profonds.

Fig. 19.

Dans ce modèle l'ajustement des résistances r et r' a permis à L. Gougerot d'expliquer l'inflexion observée sur les diagrammes d'admittance de la peau de l'avant bras dans la zone de 4 à 10 kilocycles. (10)

L'impédance de chaque Philippon est un cercle de même diamètre mais décalé plus ou moins suivant la valeur de r et r' .

L'admittance de chaque branche sera donc encore un cercle, cette fois-ci de diamètre différent (l'inverse d'un cercle ne passant pas par l'origine est un cercle).

L'admittance totale sera la somme vectorielle des admittances partielles.

DISTINCTION ENTRE PLANS SUPERFICIELS ET PLANS PROFONDS.

L'impédance d'un tissu n'est atteinte le plus souvent qu'à travers celle des plans superficiels.

L'accès direct aux tissus profonds par des électrodes aiguilles couramment utilisées dans la détection des potentiels d'action EEG et ECG est à l'origine de causes d'erreurs quand on mesure une impédance.

La densité de courant $\frac{I}{S}$ est très grande autour d'électrodes aiguilles; la majeure partie de la chute de potentiel se fait donc dans leur voisinage immédiat, exagérant fortement dans l'impédance globale la part du tissu superficiel.

On remarquera à ce propos que la résistance du tissu étudié dépend de la surface des électrodes et de l'épaisseur du tissu interposé entre les deux électrodes (l'impédance est inversement proportionnelle à la surface des électrodes).

$$R = \rho \frac{e}{S} \qquad d(\text{densité du courant}) = \frac{I}{S}$$

$$\text{d'où} \quad RI = \rho \cdot e \cdot d.$$

R : résistance du tissu
e : épaisseur.
S : surface des électrodes
 ρ : résistivité.

Ce qui indique que pour des tranches d'égale épaisseur la différence de potentiel est proportionnelle à la densité de courant. En d'autres termes les lignes équipotentielles normales aux lignes de courant seront d'autant plus serrées que la densité sera plus grande.

La distinction entre plan superficiel et profond peut être réalisée sans effraction cutanée par la technique de Horton et Van Raverswaay, modifiée par Barnett (1) et par Rosendal (18).

Une électrode d'amenée C est située vis à vis de deux autres électrodes concentriques centrale B périphérique A.

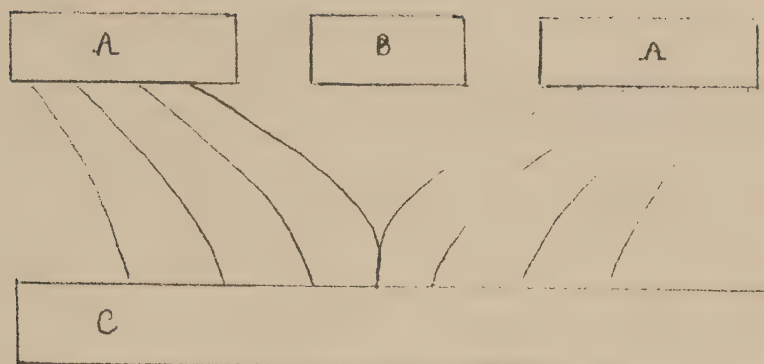


Fig. 20.

Si l'on veut mesurer l'impédance des plans superficiels le courant imposé est amené par C et A. La différence de potentiel est mesurée entre A et B par un appareil à grande impédance d'entrée de façon qu'aucun courant ne passe par B (qui va en pratique à la grille d'une lampe).

Les lignes de courant divergent au voisinage de B, électrode sous laquelle la densité de courant est nulle. Le potentiel de B est très voisin du potentiel des plans sous-jacents. Et tout se passe comme si B était enfoncé dans le tissu profond. Cet enfoncement étant d'autant plus profond que le diamètre intérieur de la couronne A est plus grand.

Il est clair dans ces conditions que la différence de potentiel entre A et B puisse être considérée comme due uniquement aux plans superficiels.

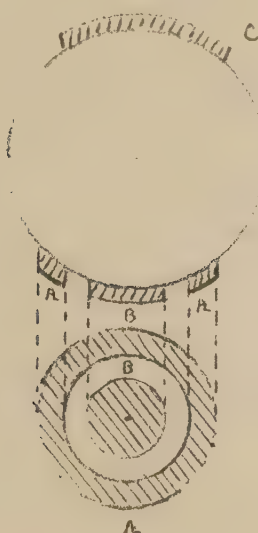


Fig. 21.

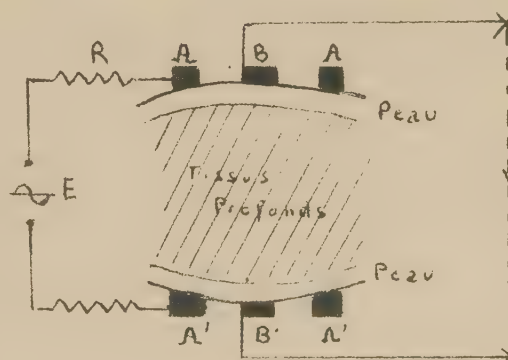


Fig. 22.

Pour la mesure des plans profonds, on peut recourir au dispositif de la figure 22.

Ces méthodes révèlent une différence essentielle : la valeur de la capacité des plans superficiels est beaucoup plus élevée que celle des plans profonds au point que l'on peut assimiler ces derniers à une résistance ohmique de faible valeur, lorsque l'on n'étudie que les basses fréquences. Pour des fréquences élevées, l'influence de la capacité de ces plans profonds se fera sentir; c'est le cas en glottographie où l'on est obligé d'utiliser des fréquences élevées pour que la fréquence de la porteuse soit très nettement supérieure à la fréquence acoustique de modulation.

On aurait pu croire que les capacités cutanées étaient suffisamment élevées pour que leur impédance soit négligeable à des fréquences supérieures à 30.000 Hertz; (ces capacités se comportant alors comme un court-circuit).

Mais l'expérience nous a montré que l'impédance des plans profonds était très basse et qu'ainsi, même faible l'impédance de la peau mise en série ne pouvait être négligée.

Par contre, après érosion de la peau, on peut admettre que les électrodes sont au contact du tissu cellulaire sous-cutané, de faible épaisseur, de très faible résistance si les fréquences où l'on opère sont élevées. Ce plan cutané érodé contribue alors à une résistance pure série dont on connaîtra la valeur par extrapolation à fréquence infinie, et qui pourra le plus souvent, pour notre propos, être négligée. Les différences entre le lieu d'impédance laryngée peau intacte et peau érodée, apparaissent nettement sur les figures 35 et 36.

On voit que dans le 2ème cas, le relèvement du lieu n'apparaît plus qu'à 3.200 Hz.

IMPEDANCES HOMOTHETIQUES.

Des impédances homothétiques ont le même angle de phase. Le rapport d'homothétie est égal au rapport de leurs modules qui est un nombre réel :

$$Z = Z_0 \cdot e^{j\varphi}$$

$$Z' = Z'_0 \cdot e^{j\varphi}$$

$$\frac{Z}{Z'} = \frac{Z_0}{Z'_0} = k$$

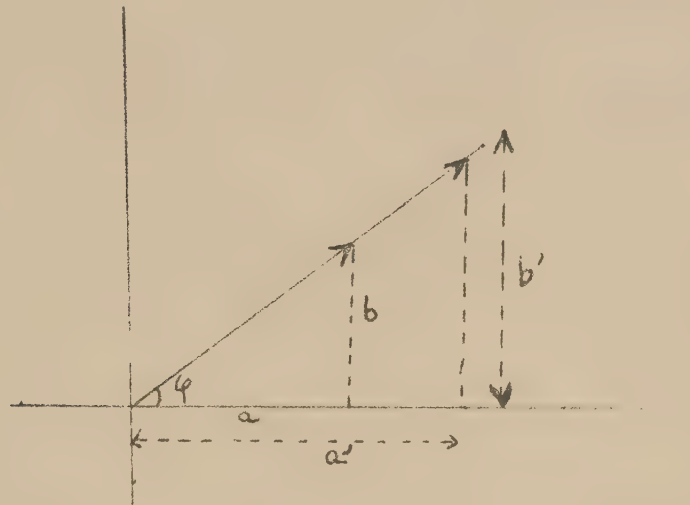


Fig. 23.

$$Z = k Z'$$

$$a + jb = k (a' + jb')$$

Pour avoir un modèle homothétique il suffit de multiplier terme réel et terme imaginaire, c'est à dire résistance ohmique et réactance par le même nombre.

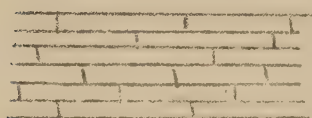
Il est facile de vérifier que l'association en série ou en parallèle de deux modèles de Philipppson identiques donneront un modèle dont l'impédance sera homothétique du modèle initial.

On conçoit donc que le lieu d'impédance d'une cellule isolée ou d'une suspension de cellules homogènes, soit le même à un rapport d'homothétie près.

Pour une suspension de cellules, cela sera vrai quel que soit le sens des lignes de courant traversant la préparation; on pourrait dire en cela qu'une suspension de globules rouges est un système dont l'impédance est isotrope. De même on peut vérifier expérimentalement que l'angle de phase est le même quelle que soit l'épaisseur de la suspension.

En est-il de même pour une préparation musculaire ? Non, l'angle de phase, pour une fréquence donnée, va varier suivant que le sens des lignes de courant est parallèle ou perpendiculaire à la direction des fibres musculaires.

Le nombre de membranes traversées sera différent, donc le nombre d'éléments capacitifs mis en jeu.



Et surtout les membranes traversées dans un sens n'ont sans doute pas une impédance homothétique des membranes qui sont traversées dans l'autre sens.

Cependant, cette différence de phase peut être faible dans certaines conditions. Elle dépend de l'épaisseur, de la constitution, des muscles étudiés, et il est parfois possible dans une hypothèse simplificatrice d'estimer comme homothétiques deux impédances musculaires, bien qu'elles ne soient pas attaquées exactement de la même façon par les lignes de courant.

Nous avons fait à ce sujet des expériences sur le muscle de grenouille; Elles seront présentées et discutées avec les autres résultats expérimentaux.

LES VARIATIONS D'IMPEDANCE

Les impédances biologiques sont des grandeurs variables. Leurs variations sont sous la dépendance d'un grand nombre de facteurs.

On peut schématiquement opposer deux types de variation d'impédance.

a- Variations électro-physiologiques :

Ce sont les variations d'impédance liés aux phénomènes qui se passent au sein même de la membrane, le type en est la variation observée au cours de l'excitation: Phénomène contemporain, sinon synchrone de la dépolarisation, elle-même étroitement liée aux échanges ioniques de part et d'autre de la membrane. (Brusque perméabilité à l'ion sodium).

Cole et Curtis ont montré qu'au cours de la phase ascendante de l'activité, la conductance de la membrane augmentait brusquement pour décroître ensuite, revenant lentement à sa valeur normale de repos (3). Cette modification porte surtout sur la résistance qui s'abaisse, alors que la capacité ne change pas ou peu.

b- Variations du type mécanique :

La variation d'impédance observée n'est plus due à un phénomène membranaire, mais à une modification mécanique de l'organe étudié :

- compression ou étirement d'un muscle venant modifier la valeur de la résistance ohmique en série d'un schéma de Philippon Cole, par exemple
- modification de la valeur de la capacité glottique au cours de la phonation.
- modification de l'impédance des vaisseaux, synchrone du pouls.

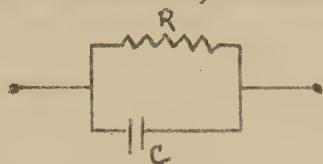
Ces deux types de variations peuvent s'imbriquer, leur distinction devient alors difficile, d'autant qu'il faut pouvoir différencier les variations mécaniques se passant au sein même des organes, des artefacts liés aux variations de contact des électrodes.

Variation du module et de la phase.

Il importe de connaître à la fois ces deux éléments pour savoir quels paramètres du schéma électrique équivalent sont en cause lors de la variation observée.

En travaillant alors à une fréquence déterminée, il est possible, soit d'étudier séparément les variations du module et de la phase en fonction du temps, on obtient deux tracés que l'on peut comparer; soit toujours à fréquence donnée, d'étudier le Lieu de variation d'impédance, dans le plan complexe. L'allure de ce lieu permettant du moins dans les cas simples de savoir quel paramètre est en cause.

Quel sera par exemple le lieu de variation d'impédance, à fréquence donnée, d'un modèle fait d'une capacité statique pure, constante, shuntée par une résistance R variable ?



$$\text{On a : } \frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + jC\omega_0$$

L'affixe de cette admittance a donc dans le plan complexe pour coordonnées :

$$\frac{1}{R} \text{ et } C\omega_0$$

Si R varie, l'affixe de l'admittance va décrire une droite parallèle à l'axe réel.

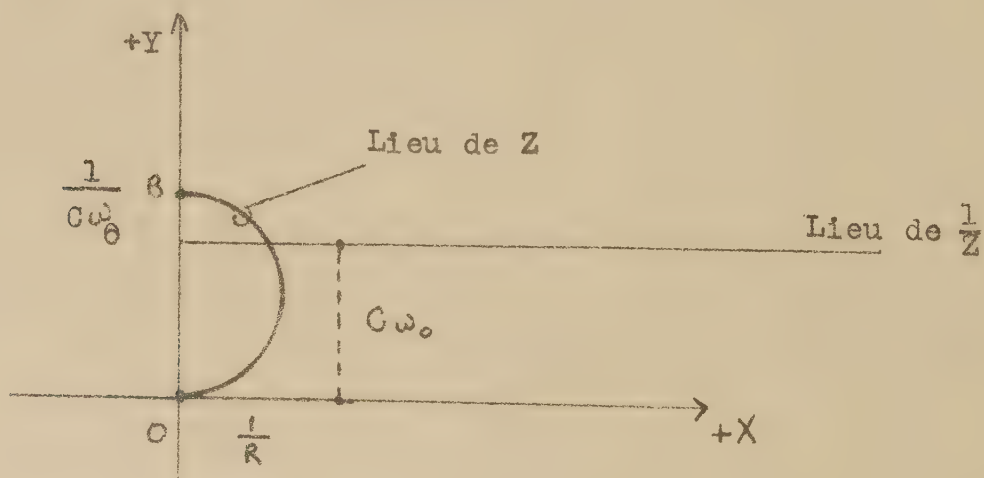


Fig. 24.

L'affixe de l'impédance décrira donc l'inverse de cette droite, soit un cercle passant par l'origine, centré sur l'axe imaginaire, le diamètre de ce cercle étant d'autant plus grand que ω_0 fréquence choisie sera plus petite. On aura ainsi un cercle pour chaque fréquence.

Le point B correspond à une résistance infinie, et quand $R = 0$, l'impédance devient nulle.

Ainsi pour comprendre le mécanisme exact d'une variation d'impédance biologique, c'est à dire connaître à la fois le schéma électrique équivalent et savoir dans ce schéma quels sont les éléments qui varient, on conçoit qu'il faille être en possession de deux séries de résultats expérimentaux et des deux à la fois.

1- le diagramme d'impédance du tissu ou de l'organe étudié en fonction de la fréquence.

2- le lieu de variation d'impédance à fréquences fixes en fonction du stimulus envisagé, stimulation sympathique dans l'étude de l'impédance cutanée, phonation dans l'étude de l'impédance laryngée, stimulation électrique dans l'étude de l'impédance d'un nerf.

Ces deux données doivent être recueillies au cours de la même expérience de la façon la plus rapprochée l'une de l'autre, afin d'éviter des erreurs essentiellement imputables au matériel biologique étudié, dessiccation des préparations, variations d'imprégnation des électrodes de contact, fatigue du sujet.

LA TECHNIQUE DE MESURE : METHODE DU CERCLE POINTE

Cette technique conçue par L. Gougerot⁽¹⁾ est destinée à éliminer tous calculs dans la mesure d'une impédance, et à placer directement sur l'écran d'un oscillographe cathodique représentant le plan complexe, le point figuratif de l'impédance $Z = X + jY$ avec ses deux coordonnées : résistance X , et réactance Y .

Principe.

Soit $\bar{Z} = Z_0 \cdot e^{j\varphi}$ l'impédance à mesurer, où Z_0 est le module et φ l'angle de phase.

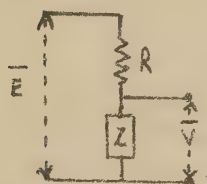
Ses coordonnées sont :

$$X = Z_0 \cos \varphi$$

$$Y = Z_0 \sin \varphi$$

Mettons en série avec Z une résistance ohmique R très grande par rapport à Z_0 (R est une résistance d'imposition), et appliquons aux bornes du tout une force électromotrice sinusoïdale constante dont la représentation complexe est :

$$\bar{E} = E_0 \cdot e^{j\omega t}$$



La tension V aux bornes de Z sera :

$$\bar{V} = \bar{E} \frac{\bar{Z}}{R + \bar{Z}} = \frac{\bar{E}}{R} \frac{\bar{Z}}{1 + \frac{\bar{Z}}{R}} \approx \frac{\bar{E}}{R} \bar{Z}$$

Donc si $R \gg \bar{Z}$

$$\bar{V} \approx \frac{E_0}{R} \cdot Z_0 \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} \approx \frac{E_0}{R} \cdot Z_0 \left[\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi) \right]$$

La tension complexe $\bar{V}$ sera proportionnelle en module et en phase à l'impédance $\bar{Z}$.

- Appliquons cette tension aux plaques de déviation horizontale d'un oscillographe cathodique (par l'intermédiaire d'un amplificateur sans déphasage bien entendu), la tension réellement appliquée est proportionnelle à la partie réelle du nombre complexe $\bar{V}$.

$$V_x = k_1 Z_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

k_1 coefficient dépendant de l'amplificateur.

- Supposons maintenant que nous appliquions aux plaques de déviation verticale cette même tension V , mais par l'intermédiaire d'un dispositif déphaseur de $\frac{\pi}{2}$

La tension réellement appliquée sera proportionnelle à la partie réelle de $\bar{V}$ déphasée de $\frac{\pi}{2}$ c'est à dire à sa partie imaginaire.

$V_y = k_2 \cdot Z_0 \sin (\omega t + \varphi)$ avec k_2 dépendant cette fois-ci, à la fois du dispositif déphaseur ~~de~~ de l'amplificateur.

- Régions les amplificateurs de manière que $k_1 = k_2$ le spot de l'oscilloscope décrira le cercle ayant pour équation paramétrique :

$$X = k Z_0 \cos (\omega t + \varphi)$$

$$Y = k Z_0 \sin (\omega t + \varphi)$$

où k est un certain coefficient de proportionnalité facile à évaluer expérimentalement en prenant pour Z une résistance connue.

Envoyons maintenant sur le Wehnelt, préalablement négativé jusqu'à l'extinction du spot, une impulsion positive aux instants : $t_0 = 2n \frac{\pi}{\omega}$ (n étant entier), le spot s'allume à cet instant seulement, et le point marqué aura pour coordonnées :

$$X = kZ_0 \cos \varphi$$

$$Y = kZ_0 \sin \varphi$$

soit avec l'unité k , la résistance et la réactance de l'impédance à mesurer.

L'oscillatrice alimente d'une part le circuit AT, d'autre part synchronise le générateur d'impulsions de sorte que Wehnelt s'éclaire à :

$$2n \frac{\pi}{\omega}$$

c'est à dire toutes les périodes.

Schéma d'ensemble

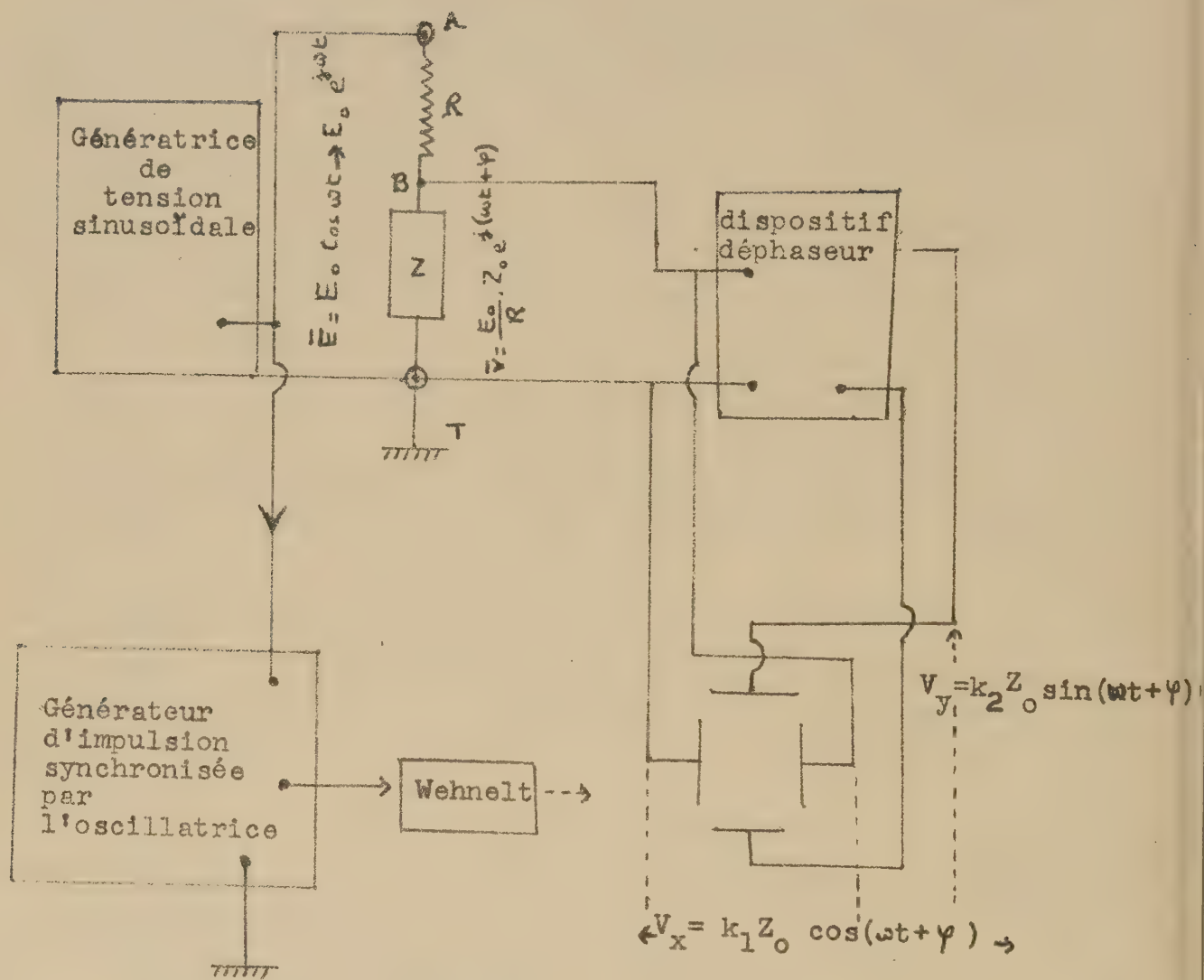


Fig. 25.

Le dispositif déphaseur de $\frac{\pi}{2}$ est un pont de phase permettant une parfaite indépendance des réglages de la phase et de l'amplitude.

Pour avoir un lieu d'impédance en fonction de la fréquence, on substitue à Z , impédance à mesurer, une résistance ohmique R' connue, 100 ohms par exemple.

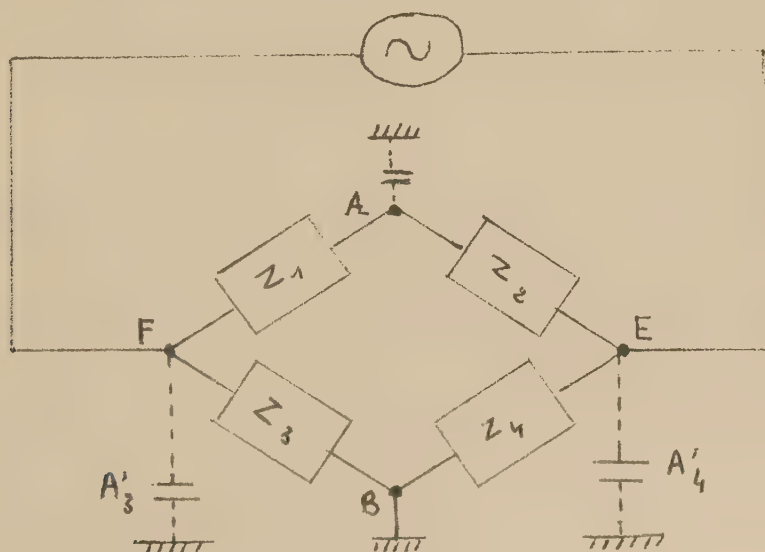
On règle alors la synchronisation du top de sorte que le point marqué se trouve sur l'axe horizontal réel, et que le module indiqué par le rayon du cercle ait une valeur déterminée à chaque cas. 1, 2, 3 cm.

On retrouve alors par exemple, pour un modèle comprenant résistance et capacité en parallèle, le lieu prévu théoriquement. Cet essai sert au contrôle de la précision de la méthode (voir Fig. 30).

- La méthode du cercle pointé a surtout l'avantage de pouvoir suivre les variations d'impédance même rapides qui peuvent se produire à fréquence donnée, dans un modèle ou un tissu.

- A fréquence donnée, si la variation d'impédance est très faible, et c'est le cas en glottographie où nous verrons que le module de $\frac{\Delta Z}{Z}$ est de l'ordre du millièrne, la méthode directe est inapplicable, et il est indispensable d'utiliser une méthode de zéro.

La plus simple est une méthode de pont; la tension recueillie aux bornes de la diagonale de mesure est après une amplification sélective suffisante appliquée au dispositif d'inscription.



Les pointillés figurent l'emplacement des capacités parasites.

Fig. 26.

- Si $\overline{Z_1}$, $\overline{Z_2}$, $\overline{Z_3}$, $\overline{Z_4}$ sont les impédances complexes constituant les 4 branches du pont, la condition d'équilibre s'écrit dans tous les cas sous la forme :

$$\overline{Z_1} \overline{Z_4} = \overline{Z_2} \overline{Z_3} \quad (I)$$

ou en faisant figurer les admittances complexes $\overline{A} = \frac{1}{\overline{Z}}$

$$\overline{A_1} \overline{A_4} = \overline{A_2} \overline{A_3} \quad (II)$$

Mais comme ces quantités sont des expressions imaginaires, l'équilibre du pont en courant alternatif nécessite obligatoirement deux réglages indépendants permettant d'équilibrer, l'un les termes actifs (résistances), l'autre les termes réactifs.

Ceci explique que l'on puisse utiliser deux types de pont : le pont parallèle ou le pont série.

En haute fréquence, l'existence d'impédances parasites (surtout capacitives) rend indispensable la compensation du pont.

Lorsque l'une des diagonales est reliée à la masse, l'impédance parasite existant entre A et la masse, shunte le détecteur et n'intervient pas dans l'équilibre du pont.

Les admittances $\overline{A_3}'$ et $\overline{A_4}'$ shuntent respectivement les branches $\overline{Z_3}$ et $\overline{Z_4}$. Les "admittances apparentes" des branches BE et BF deviennent alors $\overline{A_3} + \overline{A_3}'$ et $\overline{A_4} + \overline{A_4}'$.

La condition d'équilibre s'écrit donc :

$$\begin{aligned} \overline{A_2} (\overline{A_3} + \overline{A_3}') &= \overline{A_1} (\overline{A_4} + \overline{A_4}') \\ \overline{A_2} \overline{A_3} + \overline{A_2} \overline{A_3}' &= \overline{A_1} \overline{A_4} + \overline{A_1} \overline{A_4}' \end{aligned}$$

pour que l'on retrouve la condition normale d'équilibre (II) il faut que $\overline{A_2} \overline{A_3}' = \overline{A_1} \overline{A_4}'$. C'est la "condition de compensation" qui n'est autre que la condition d'équilibre du pont lorsque sont déconnectées de F et de E les impédances $\overline{Z_3}$ et $\overline{Z_4}$.

Cette condition de compensation n'est donc réalisée que pour une valeur donnée du rapport $\frac{\overline{A_1}}{\overline{A_2}}$.

Ce rapport $\frac{\overline{A_1}}{\overline{A_2}} = \frac{\overline{Z_2}}{\overline{Z_1}}$ constitue dans notre montage

le rapport de tête de pont. Il doit donc être fixe pour éviter de refaire la compensation du pont entre chaque mesure. Il a été choisi égal à 1, ce qui est toujours préférable pour la symétrie du montage. Cette condition est aussi celle qui correspond au maximum de sensibilité de la mesure.

La différence de potentiel V recueillie dans la diagonale de mesure a pour expression (à condition que le détecteur ait une impédance pratiquement infinie) :

$$v = E \frac{\overline{Z_2} \overline{Z_3} - \overline{Z_1} \overline{Z_4}}{(\overline{Z_1} + \overline{Z_2})(\overline{Z_3} + \overline{Z_4})}$$

Cette tension est nulle à l'équilibre où l'on a : $\overline{Z_2} \overline{Z_3} = \overline{Z_1} \overline{Z_4}$, on peut montrer (5') que lorsque l'impédance $\overline{Z_3}$ varie de $\Delta \overline{Z_3}$, ($\Delta \overline{Z_3}$ restant suffisamment faible pour être considérée comme une différentielle), il apparaît aux bornes de la diagonale de mesure une tension de déséquilibre ΔV donnée par :

$$\Delta V = E \frac{s}{(1+s)^2} \cdot \frac{\Delta \overline{Z_3}}{\overline{Z_3}}$$

Expression dans laquelle ;

E est la tension appliquée

s le rapport de tête de pont $= \frac{\overline{Z_2}}{\overline{Z_1}}$

$\frac{s}{(1+s)^2}$ constitue le facteur de pont, qui est ici réel

égal à $\frac{1}{4}$, si l'on admet du moins que les résistances constituant la tête de pont sont purement réelles. Nous reviendrons sur ce point dans la description de l'appareillage.

La tension de déséquilibre du pont est donc proportionnelle à la variation relative d'impédance $\frac{\Delta \overline{Z_3}}{\overline{Z_3}}$ que l'on

désignera maintenant par $\frac{\Delta Z}{Z}$.

Si Z est l'impédance complexe susceptible de varier ($\bar{Z} = Z_0 e^{j\varphi}$)

$\frac{\Delta Z}{Z}$ variation relative sera également complexe.

En prenant les logarithmes : $\text{Log } Z = \text{Log } Z_0 + j\varphi$

En différentiant :

$$\boxed{\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta Z_0}{Z_0} + j \Delta \varphi}$$

Donc :

- la partie réelle de la tension de déséquilibre ΔV est proportionnelle à la variation relative du module.

- la partie imaginaire de ΔV correspond à la variation absolue de la phase.

En pratique on opérera de la façon suivante :

- 1- équilibre du pont sur résistance R connue
- 2- déséquilibre provoqué par une variation dR connue, permettant de déterminer la sensibilité voulue, l'ajustage du spot sur l'axe réel.
- 3- substitution à cette résistance connue R' de l'impédance Z . Nouvel équilibre.
- 4- Lors de la variation de Z , le spot décrira sur l'écran la courbe de l'affixe de $\frac{\Delta Z}{Z}$, qui pourra être photographiée, lorsque l'exige la rapidité de la variation.

Le pont parallèle.

Avec une tête de pont égale à l'unité, à l'équilibre on a $z = Z$.

Si l'équilibre établi on fait varier R de dR , tous les autres éléments du pont restant constants évidemment, il apparaît une tension de déséquilibre ΔV . Elle est à l'origine du tracé sur l'écran de l'oscilloscope de l'affixe de la variation relative d'impédance $\frac{\Delta Z}{Z}$.

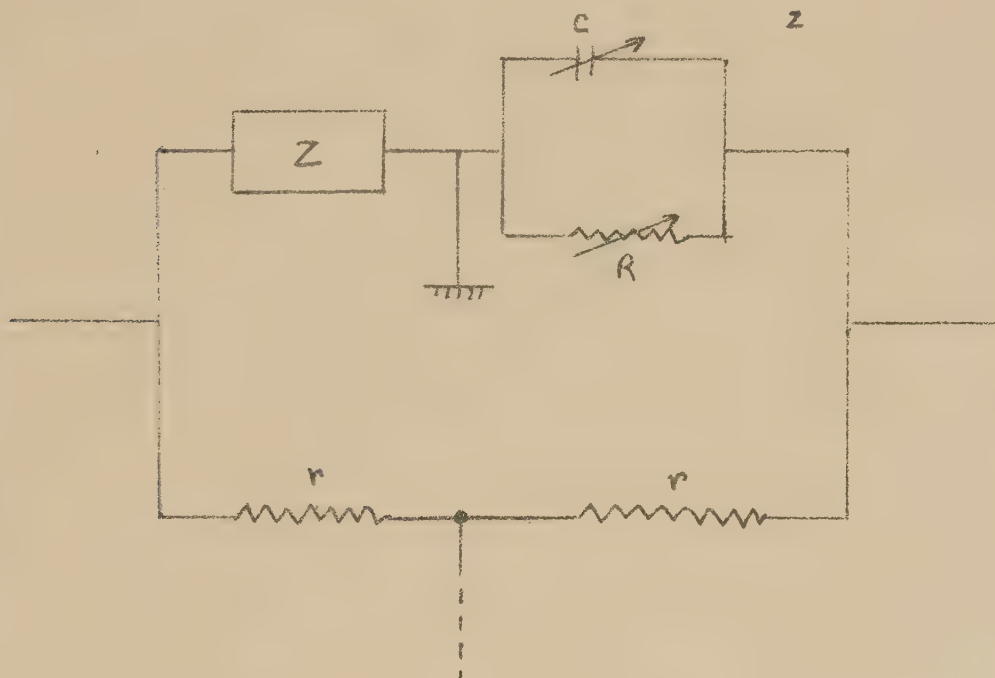


Fig. 27.

Puisque dans la branche d'équilibre on a :

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + jC\omega$$

En différentiant il vient :

$$\frac{\Delta Z}{Z^2} = \frac{\Delta R}{R^2}$$

$$\frac{\Delta Z}{Z} = Z \frac{\Delta R}{R^2}$$

L'argument de $\frac{\Delta R}{R^2}$ quantité purement réelle est nul.

L'argument de $\frac{\Delta Z}{Z} =$ l'argument de Z .

Ainsi on peut après équilibre préalable, connaître expérimentalement la phase de l'impédance étudiée en notant la direction du spot provoquée par une variation de la résistance d'équilibre R .

Cette "phase expérimentale" doit être évidemment la même que celle mesurée directement sur le diagramme d'impédance.

Si revenant à l'équilibre on fait varier C de dC , en différentiant : $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + jC\omega$

On obtient cette fois-ci :

$$-\frac{\Delta Z}{Z^2} = j\omega \Delta C$$

$$\frac{\Delta Z}{Z} = -Z j \omega \Delta C$$

$\omega \Delta C$: quantité purement réelle à un argument nul.

Donc : argument de $\frac{\Delta Z}{Z} = \pi + \arg. Z + \frac{\pi}{2}$

Le spot décrira cette fois-ci une droite perpendiculaire à la phase Z .

Pont série

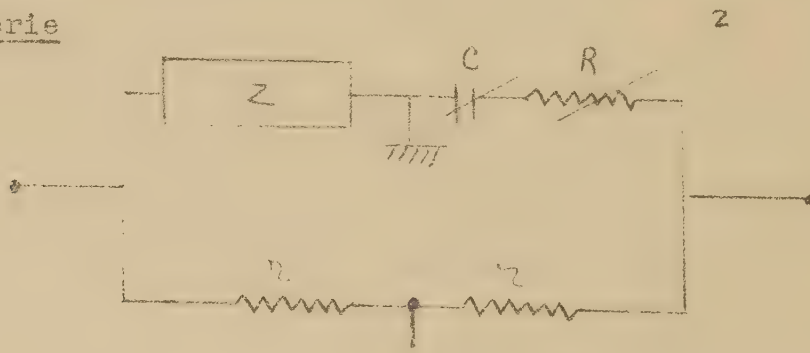


FIG. 28

Le spot décrit un trajet différent du tracé observé en pont parallèle.

Dans le pont série on a : $Z = R + \frac{1}{j C \omega}$

Si R varie : $\Delta Z = \Delta R$
 $\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta R}{Z} = \frac{\Delta R}{Z_0} e^{-j\varphi}$

donc la variation du spot se fait sur un axe symétrique de celui de la phase de Z par rapport à l'axe des X.

Si C varie : $\Delta Z = - \frac{\Delta C}{j \omega C^2} = + j \frac{\Delta C}{C^2 \omega}$
 $\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{j}{Z} \frac{\Delta C}{C^2 \omega}$ or $Z = Z_0 e^{j\varphi}$

donc : $\frac{\Delta Z}{Z} = j \cdot e^{-j\varphi} \frac{\Delta C}{Z_0 C^2 \omega}$

Et le trajet de $\frac{\Delta Z}{Z}$ est cette fois perpendiculaire à l'axe symétrique de Z par rapport à l'axe des X.

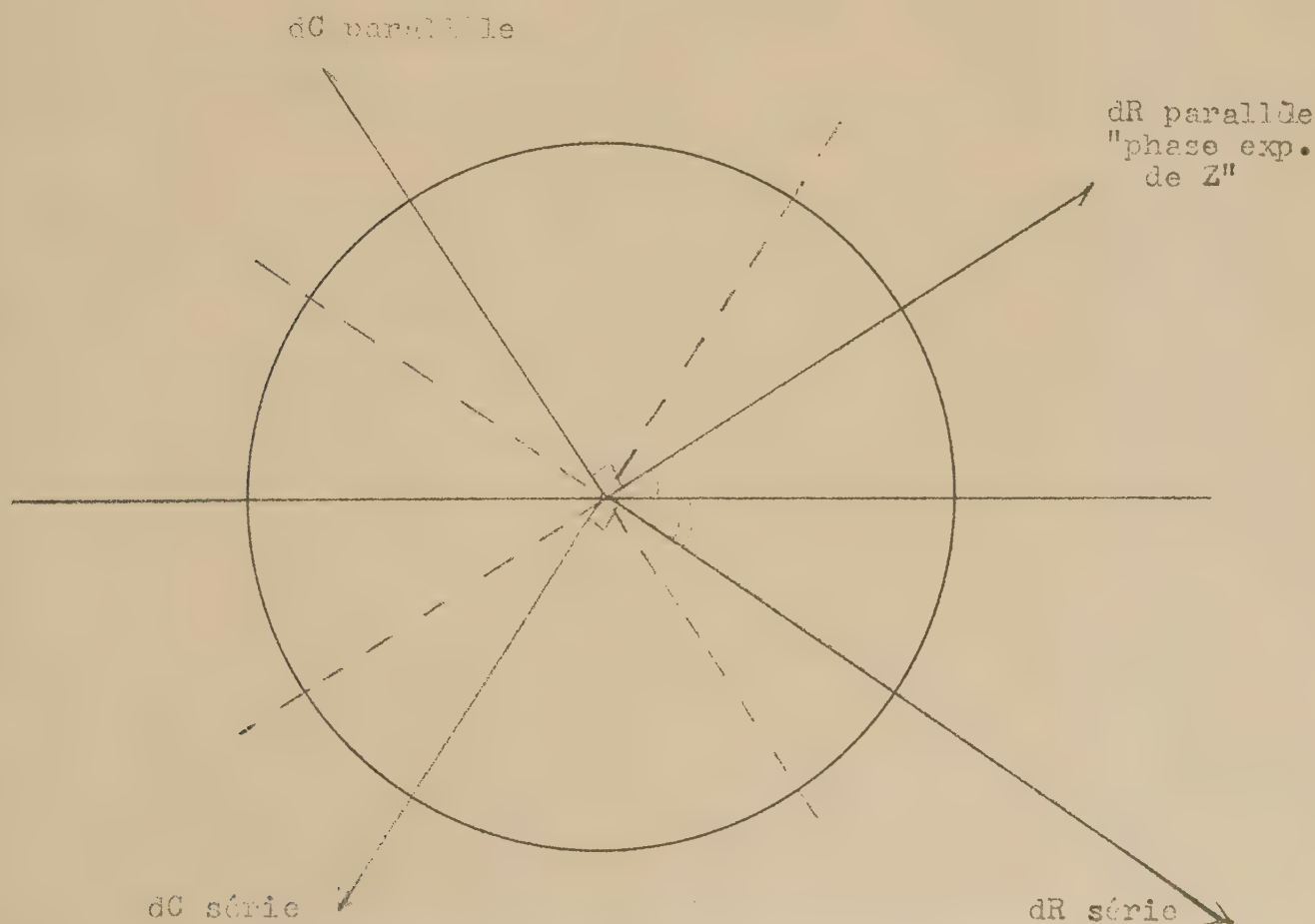
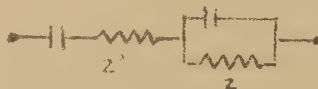


Fig. 29.

Les différents résultats ont été résumés sur la fig.29. Ce cadran permet de vérifier le bon fonctionnement de l'appareil à cercle pointé.

En pratique les trajets dR série et dC série peuvent être déterminés par mise en série sur le modèle parallèle d'une petite résistance de 1 ohm et d'une grosse capacité de 1 μ F de façon à ne pas modifier la valeur du modèle parallèle.

On a : $Z = z' + z$



quand z varie $\Delta Z = \Delta z$

avec $\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta R}{R^2}$ si R varie $\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{z^2}{Z} \frac{\Delta R}{R^2}$

Mais si $z' \ll z$ (ce qui est le cas) $Z \approx z$

et l'on retrouve bien $\frac{\Delta Z}{Z} = z \frac{\Delta R}{R^2}$

Un graphique est donc établi par le calcul à partir d'un modèle RC parallèle. Ce graphique n'est valable que pour une fréquence donnée. Plutôt que d'en établir un pour les 4 fréquences de travail, on a gardé le même ce qui évite de changer de cadran. Il faut changer à chaque fréquence la valeur de la capacité parallèle afin que $\text{tg } \varphi = RC\omega$ reste constante.

Initialement ces différents réglages nous ont permis de juger de la bonne compensation du pont. En l'absence de celle-ci, en effet, les trajets théoriques et expérimentaux de $\frac{\Delta Z}{Z}$ ne coïncident plus. Nous refaisons avant chaque mesure cet étalonnage qui permet de vérifier la stabilité de l'appareil.

DISPOSITIF A CERCLE POINTE

La réalisation d'un dispositif à cercle pointé en haute fréquence se heurte à une première difficulté : l'obtention d'impulsions extrêmement brèves de façon que le pointage soit précis.

A 200 KHz, la période (qui est le temps que met le spot pour faire un tour complet) est 5 microsecondes.

Si le rayon du cercle est 4 cm, la longueur du marquage obtenu avec une impulsion de 0,05 microseconde sera le 1/100 de la circonférence, soit 2,5 mm ce qui est acceptable.

Il est très difficile d'obtenir des impulsions aussi brèves ayant encore une amplitude suffisante pour moduler le Wehnelt. Nous avons donc utilisé le générateur d'impulsions Férisol type P 201 A (0,05 microseconde à 1 milliseconde de 10 Hz à 100 KHz). Une telle brièveté est obtenue par une ligne à retard qui retarde le début de l'impulsion par rapport au signal qui commande la fin de l'impulsion.

Les autres difficultés de réalisation viennent des capacités parasites qu'il faut éviter avec soin.

Description.

1- L'oscillateur ECC40

L'oscillateur est un oscillateur type mutivibrateur accordé. (planche annexe)

- on reconnaît les condensateurs de liaison entre plaque et grille de la double triode ECC40 ($C_1 - C_2$).

- dans la sortie plaque de la 2ème triode, est inséré un circuit d'accord L_1 .

La self est accordée sur 4 fréquences fixes 33, 64, 126, 229 KHz par 4 condensateurs dont le retour se fait à la masse. Ils sont isolés du + HT par un condensateur de 0,25 μ F qui se comporte comme un court-circuit vis à vis de la HF et qui évite que le commutateur de gamme soit à la HT.

- La résistance variable de 5K insérée dans la grille g_1 règle l'accrochage de l'oscillateur.

- Sur cette même grille, par l'intermédiaire de 100K on dispose d'une borne de synchronisation. La tension prélevée est suffisante (15 volts) pour synchroniser le générateur d'impulsions nécessaire au marquage du cercle.

Note : Pour nos premières expériences les 2 fréquences les plus élevées avaient été 248 et 128 KHz. Une modification du potentiomètre d'accrochage dont la variation était trop rapide a été faite ultérieurement ramenant ces fréquences à 229 et 126 KHz. Ceci explique que dans nos résultats expérimentaux les 2 fréquences supérieures ne soient pas toujours les mêmes.

2- Le cathode Follower de puissance EL41

L'oscillateur délivre une tension de 10 volts sous une impédance trop élevée pour attaquer directement la tête de pont de 100 ohms du pont d'impédance.

La chute de débit provoque une modification des capacités apparentes de la self d'accord, cause d'erreur lors des mesures de phase.

- Aussi est-on obligé d'intercaler entre l'oscillateur et le pont de mesure, un cathode Follower de puissance; Cet étage est attaqué par le diviseur de tension A.B.C. Les 140 pf en parallèle sur 100K égalisent la tension d'entrée de façon à ce que le gain soit à peu près constant aux 4 fréquences.

La liaison du cathode Follower avec le pont est assurée par un transformateur HF accordé.

3- Le pont de mesure

Sa mise en service est assurée par le contacteur en position 1.

La préparation ou le sujet a une borne à la masse pour éviter les parasites.

R et C sont des résistances et capacités variables ajustées jusqu'à obtention de l'équilibre.

R est constitué par des boîtes AOIP qui se sont révélées correctes au point de vue de leur qualité haute fréquence.

C est constitué par une capacité variable à air de 1,5 nanofarad sur laquelle on peut mettre en parallèle par plots des capacités au mica de 1 à 8 nanofarads.

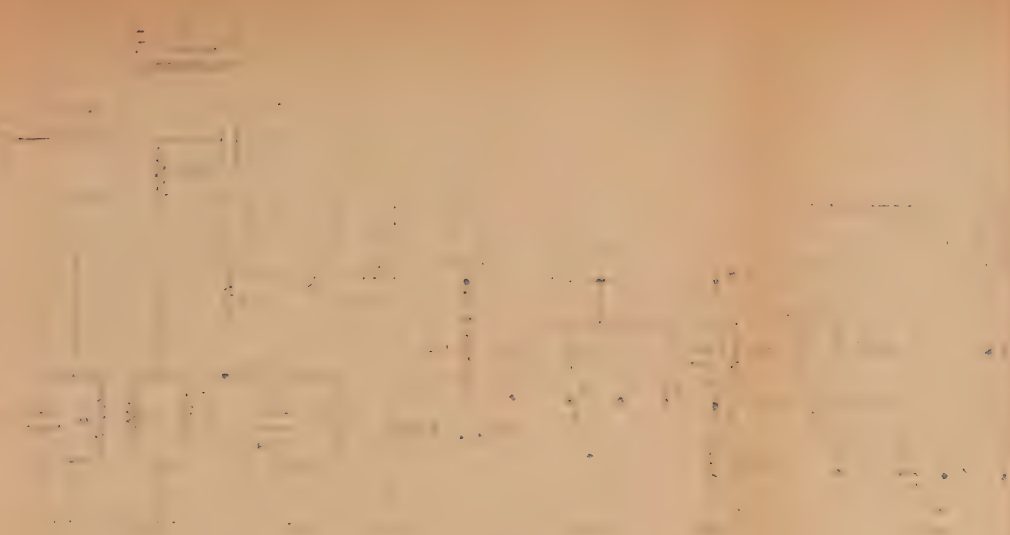
Les résistances de pont sont bobinées identiques, naturellement inductives; comme elles sont placées en tête de pont, et que leurs angles de phase sont égaux, cela n'a pas d'importance.

Au cours du déséquilibre il apparaît entre masse et grille de la 3ème lampe une tension 4V recueillie sur impédance pratiquement infinie (grille d'entrée de l'EF42).

La position 2 correspond aux mesures directes d'impédances. (voir plus loin)

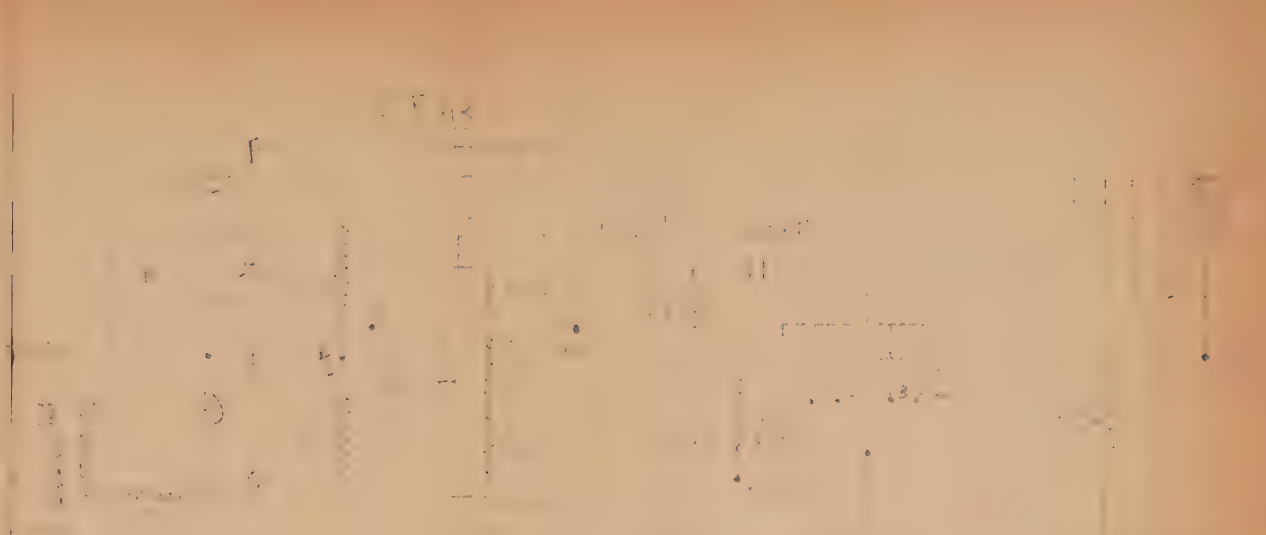
4- Le 3ème étage est un amplificateur accordé par circuit bouchon. ^{avantuel}

Le réglage du gain par potentiomètre inséré dans le circuit de sortie, ~~est~~ une source d'ennui car la capacité parasite du potentiomètre varie suivant la position du curseur, faisant varier la phase lors d'un réglage de la sensibilité.



1. $R_1 = 10 \Omega$
 2. $R_2 = 20 \Omega$
 3. $R_3 = 30 \Omega$
 4. $R_4 = 40 \Omega$
 5. $R_5 = 50 \Omega$
 6. $R_6 = 60 \Omega$
 7. $R_7 = 70 \Omega$
 8. $R_8 = 80 \Omega$
 9. $R_9 = 90 \Omega$
 10. $R_{10} = 100 \Omega$

CATHODE FELL 100
 PUISSANCE 100



1. $R_1 = 10 \Omega$
 2. $R_2 = 20 \Omega$
 3. $R_3 = 30 \Omega$
 4. $R_4 = 40 \Omega$
 5. $R_5 = 50 \Omega$
 6. $R_6 = 60 \Omega$
 7. $R_7 = 70 \Omega$
 8. $R_8 = 80 \Omega$
 9. $R_9 = 90 \Omega$
 10. $R_{10} = 100 \Omega$



1. $R_1 = 10 \Omega$
 2. $R_2 = 20 \Omega$
 3. $R_3 = 30 \Omega$
 4. $R_4 = 40 \Omega$
 5. $R_5 = 50 \Omega$
 6. $R_6 = 60 \Omega$
 7. $R_7 = 70 \Omega$
 8. $R_8 = 80 \Omega$
 9. $R_9 = 90 \Omega$
 10. $R_{10} = 100 \Omega$

Cet ennui est évité par le réglage de la polarisation de l'EF42 (lampe à pente variable), on ajuste aussi le gain à la sensibilité désirée à l'aide d'un réglage grossier et d'un réglage plus fin.

La plaque de l'EF42 doit être découplée par une résistance de 10K. et une capacité de 32 μ F, sinon on recueille dans la sortie une fraction de la tension oscillatrice.

5- Le cathode follower de sortie attaque un pont de phase. Le choix des capacités à chaque fréquence permet d'obtenir des tensions égales en amplitude et déphasées de $\frac{\pi}{2}$ nécessaires à l'obtention d'un cercle sur l'écran de l'oscilloscope; des résistances d'appoint ont été nécessaires en raison des capacités parasites, pour que le cercle soit correct.

Vérification de l'appareillage.

1- On peut tracer le lieu expérimental dans le plan complexe de l'affixe d'un modèle déterminé et fixe. On travaille alors en direct, le commutateur du pont étant sur la position 2. La borne P étant mise à la masse par mise à zéro de la résistance R.

La résistance de 100 K Ω n'est plus court-circuitée. Elle impose le courant.

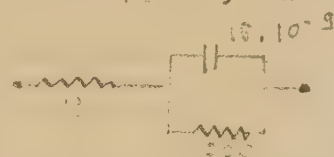
La tension recueillie entre masse et sujet Z est transmise à la grille de l'EF42.

La substitution, effectuée par une clef extérieure, à Z, impédance inconnue, d'une résistance réelle connue permet de choisir à la fois la sensibilité appropriée et l'origine des phases, le spot de marquage étant ajusté sur l'axe des X.

En refaisant la manoeuvre pour les 4 fréquences disponibles, on obtient 4 affixes.

Pour le modèle essayé dont le lieu théorique est un cercle centré sur l'axe des X, modèle Philippon, la concordance est bonne

-y ^



* points expérimentaux
• points calculés

Fig. 30.

2- On peut étudier à fréquence fixe le lieu de variation d'impédance d'un modèle dont on fait varier l'impédance. Deux procédés sont utilisés :

a- variation manuelle de l'impédance du modèle

b- variation modulée par lampe à réactance.

a- Variation manuelle de l'impédance d'un modèle.

Le modèle est celui de la page 48.

Les variations portant successivement sur les quatre paramètres donnent 4 directions de $\frac{\Delta Z}{Z}$ qui doivent coïnci-

der avec le graphique établi par le calcul.

Si on supprime à la fois les capacités du modèle et la capacité de la branche d'équilibre, une variation de résistance (dans l'une ou l'autre branche du pont) doit alors se faire sur l'axe des X.

Les résultats corrects n'ont été obtenus qu'après de nombreux remaniements. Les points les plus importants sont :

- le choix d'une tête de pont assez basse : 2 fois 100 ohms. Les premiers essais faits avec 2 fois 20.000 ohms étaient incorrects (le rôle des capacités parasites est d'autant plus marqué que les résistances ohmiques de tête de pont sont élevées).

- le cathode Follower de puissance autorisant justement une tête de pont aussi basse.

- l'orientation symétrique des résistances de tête de pont, le blindage soigné entre les différents étages.

- le découplage de l'ampli.

- le réglage de la sensibilité par polarisation variable.

b- Variation modulée par lampe à réactance.

Nous avons voulu vérifier que notre appareillage nous donnait des résultats également corrects pour une impédance modulée à fréquence acoustique (comme c'est le cas en glottographie). Pour ce faire, nous avons utilisé une lampe à réactance dont le schéma de principe est donné ci-dessous.



Fig. 31.

La self L_1 est une self de choc vis à vis de la HF. Elle empêche la HF de retourner dans le générateur BF dont les enroulements du transformateur de sortie joueraient le rôle d'un court-circuit.

La self L_2 en parallèle permet le retour à la masse de la BF, qui sinon se superposerait à la composante HF modulée.

Ce dispositif joue le rôle d'un modèle dont l'impédance sera modulée autour d'une valeur de repos, permettant d'observer pour une fréquence donnée un certain trajet.

$R = 400$ ohms

z est l'impédance d'une capacité de 5 nanofarads $5 \cdot 10^{-9}$

s est estimée à 10 mA/v soit 10^{-2}

On a donc en portant ces valeurs dans (I)

$$Z = 400 + 1 + \left[400 (s + \Delta s) \right] \frac{1}{jC \omega}$$

$$Z = 400 + (5 + 400 \Delta s) \frac{10^9}{j 10 \pi N}$$

à 128 KHz $\omega \approx 8 \cdot 10^5$

$$Z = 400 - j 1250 - j \Delta s 10^5$$

Si l'on pose $\frac{\Delta s}{s} = d\epsilon$ variation relative de la pente

$$Z \approx 400 - j 1250 - j 10^3 d\epsilon = Z_0 - j 10^3 d\epsilon$$

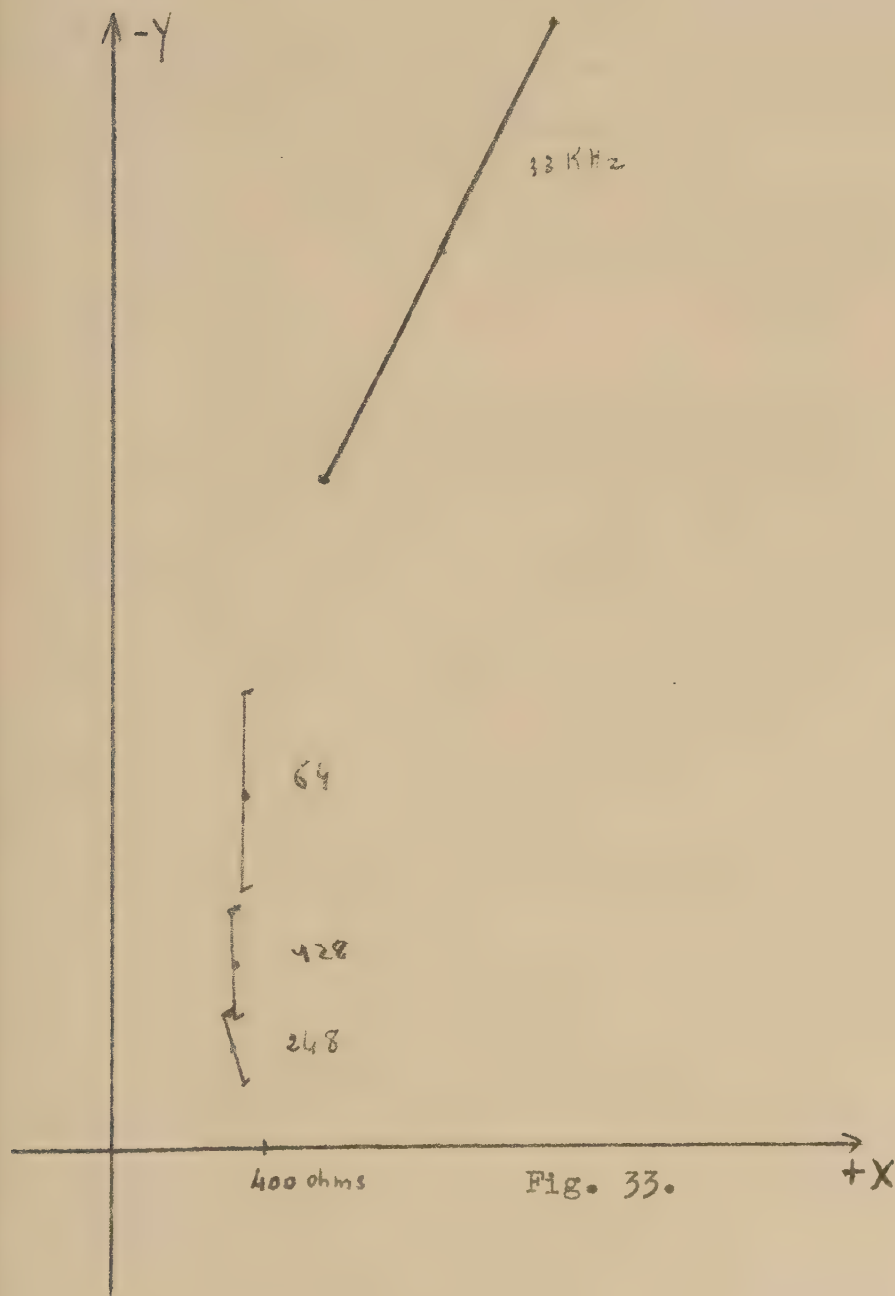
Z_0 est l'impédance, à fréquence donnée (128KHz) du modèle, en l'absence de modulation BF.

La modulation BF fait apparaître $d\epsilon$, imaginaire pure, dont le trajet doit donc être sur la verticale, élevée au point d'abscisse $X = 400$ ohms.

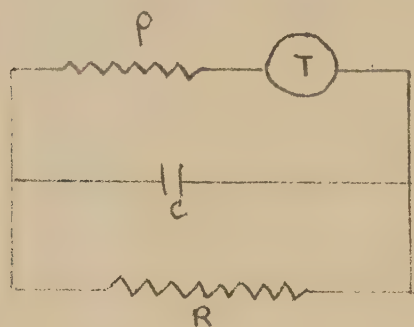
Or l'expérience nous a montré que l'impédance de cette lampe à réactance n'est pas exactement un modèle résistance et capacité en série comme le laissait prévoir le calcul précédent.

On voit en particulier qu'à 33 KHz, le trajet de modulation recueilli en direct est fortement incliné.

Ceci est dû à la self L_2 , en BF, et aux capacités parasites de la lampe et du câblage en Haute fréquence. On remarquera que les trajets correspondants aux fréquences extrêmes ont des directions opposées et que seuls s'accordent avec la théorie les trajets des fréquences moyennes 128 et 64.



D'autre part, la modulation pour être observée en direct doit être considérable; aussi pour nous rapprocher des conditions de la glottographie, nous avons obtenu une modulation de l'ordre de grandeur des variations laryngées, avec le modèle ci-joint qui constitue cette fois la branche inconnue du pont.



T représente l'impédance de la lampe à réactance au repos.
Elle variera de ΔT en activité

Fig. 34.

La résistance P est destinée à réduire la modulation qui serait considérable si T était directement placée sur le modèle RC parallèle que l'on appellera z.

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R} + jC\omega$$

$$z = P + T$$

quand dans z, T varie de ΔT , on a $\Delta z = \Delta T$

z sera l'impédance globale du modèle.

Nous avons donc calculé $\frac{\Delta z}{z}$ théorique et comparé au $\frac{\Delta z}{z}$

expérimental, cela à chaque fréquence.

Calcul de $\frac{\Delta z}{z}$ à 128 KHz.

L'expérience nous a donné $T = 300 - 450 j$

$$\Delta T = \pm 260 e^{j85^\circ}$$

} mesuré en
"direct"

P a été choisi à 8000 ohms

$$Z = 8.300 - 450 j \quad \frac{1}{Z} = \frac{1}{8.300} \left[\frac{1}{1 - \frac{4,5}{83} j} \right]$$

$$\frac{4,5}{83} \approx \frac{1}{18}$$

$$\frac{1}{Z} \text{ peut donc s'écrire } \frac{1}{Z} = \frac{1}{8.300} \left[1 + 0,054 j \right]$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} = \frac{1}{200} \left[1 + \frac{2}{83} + j \left(0,35 + \frac{0,054}{40} \right) \right]$$

Z est formé en effet de R = 200 ohms
de C = 2,2 10⁻⁹

$$\text{Donc } \frac{1}{Z} \approx \frac{1}{Z}$$

En mettant P (8000 ohms) en série avec T, on a rendu Z >> z ainsi même quand la variation de Z due à celle de T et par conséquent égale à ΔT sera grande, la variation de Z restera petite, de l'ordre de grandeur de ce que l'on observe en glottographie. Mais pour que les calculs soient corrects si l'on peut traiter ΔZ comme une différentielle, puisque cette variation est petite, il n'en n'est pas de même pour ΔZ si bien que l'on doit écrire :

$$-\frac{dZ}{Z^2} = \Delta \left(\frac{1}{Z} \right) = - \frac{\Delta Z}{Z(Z + \Delta Z)} = - \frac{\Delta Z}{Z^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta Z}{Z} \right)}$$

$\frac{1}{1 + \frac{\Delta Z}{Z}}$ est un facteur de correction qui peut s'écrire $1 - \frac{\Delta Z}{Z}$

si $\frac{\Delta Z}{Z}$ est petit.

La relation est finalement :

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{Z}{Z^2} \cdot \Delta Z \cdot \left(1 - \frac{\Delta Z}{Z} \right) \approx \frac{Z}{Z^2} \cdot \Delta Z \left(1 - \frac{\Delta Z}{Z} \right)$$

relation à laquelle correspond l'égalité d'argument :

$$\arg. \frac{dZ}{Z} = \arg. z - 2 \arg. Z + \arg. \Delta Z + \arg. \left(1 - \frac{\Delta Z}{Z}\right)$$

à 128 KHz, le facteur de correction est négligeable
puisque :

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{280}{8.300} = 0,03$$

$$\arg. z = - 19^\circ$$

$$\arg. Z = - 3^\circ$$

$$\arg. \Delta Z = \arg. \Delta T = 85^\circ$$

On trouve donc un $\frac{\Delta Z}{Z}$ théorique à 72°

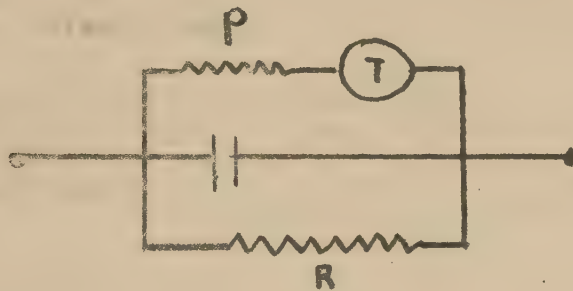
pour une mesure expérimentale "en pont" $\frac{\Delta Z}{Z}$ à 74° .

Nous avons fait les mêmes calculs pour les 3 autres fréquences. Ils sont résumés dans le tableau suivant. Le facteur de correction n'est plus négligeable à 33 KHz où il explique la courbure observée quand la modulation est poussée.

Ceci nous a permis de conclure à la correction des mesures relevées en pont du moins avec une marge d'erreur inférieure à 5%.

Calculs des erreurs sur l'argument de $\frac{\Delta Z}{Z}$

	P	C	R	T	$\Delta T = \Delta Z$	Arg. Z	Arg. théo. de $\frac{dZ}{Z}$	Arg. Expériment. de $\frac{dZ}{Z}$
33	8.000	$8,5 \cdot 10^3$	200	$570 - j2200$	$\pm 850 e^{-j81^\circ \frac{1}{2}}$	$-14^\circ \frac{1}{2}$	$-66^\circ \frac{1}{2}$ avec $\pm 5^\circ$ à cause de la correction	$-61^\circ \frac{1}{2}$
64	8.000	$44 \cdot 10^3$	200	$400 - j1000$	$\pm 600 e^{-j84^\circ}$	$-6^\circ \frac{3}{4}$	$-89^\circ \frac{1}{4}$	-90°
128	8.000	$22 \cdot 10^3$	200	$300 - j450$	$\pm 350 e^{-j85^\circ}$	-3°	72°	74°
229	8.000	$118 \cdot 10^3$	200	$250 - j260$	$\pm 150 e^{-j88^\circ \frac{1}{2}}$	$-1^\circ \frac{3}{4}$	$67^\circ \frac{1}{2}$	70°



Calculs des erreurs sur le module de $\frac{\Delta Z}{Z}$

N	$ \frac{\Delta Z}{Z} $ expérimental	$ \frac{\Delta Z}{Z} $ théorique
33	$23 \cdot 10^{-4}$	$21 \cdot 10^{-4}$
64	$17 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$
128	$9 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$
229	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$

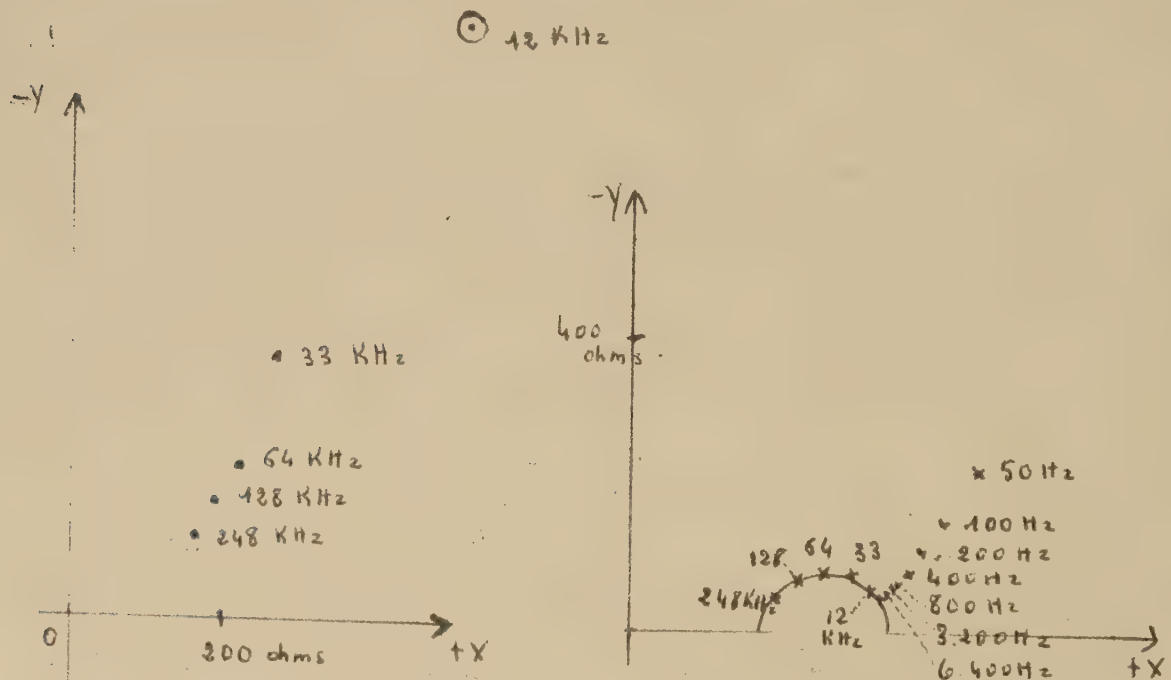
On voit qu'il y a une erreur systématique en augmentation, mais au fond peu importante.

LES DONNEES EXPERIMENTALES

1- Le lieu d'impédance du larynx

Deux électrodes d'argent rectangulaires de $0,8 \text{ cm}^2$, sont appliquées à l'aide d'une sangle élastique symétriquement contre la saillie du cartilage thyroïde. L'impédance laryngée est mesurée, le dispositif étant sur la position "directe". Les mesures en basses fréquences sont établies à l'aide d'un appareil à cercle pointé analogue à celui que nous avons décrit ici.

Comme on pouvait le prévoir l'allure du lieu varie suivant que la peau est intacte ou non.



Peau intacte
Fig. 35

peau érodée
Fig. 36.

Si la peau est érodée jusqu'à destruction de l'épiderme par friction à la pâte à électrode, la résistance des plans cutanés baisse beaucoup et l'impédance cutanée en série ne fait plus sentir son influence qu'aux basses fréquences.

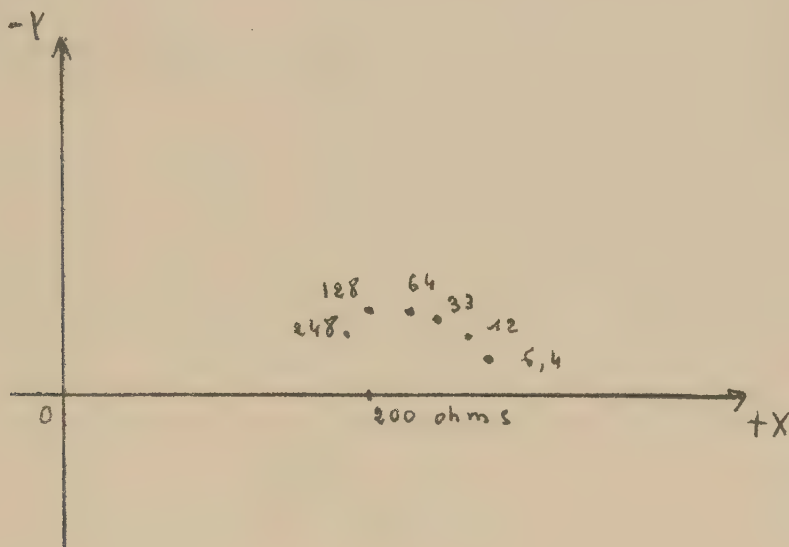


Fig. 37.

Si bien que jusqu'à 6.400 Hz on peut considérer les points expérimentaux comme appartenant à un cercle qui constitue le lieu d'impédance laryngée proprement dit, la déformation à partir de 6.400 Hz venant des plans superficiels.

Ce lieu circulaire a été retrouvé constamment. Il s'est avéré nécessaire pour diminuer d'avantage l'influence de la résistance série superficielle d'interposer entre peau érodée et électrode, un papier filtre de même dimension, trempé dans une solution de Cl Na à 2 équivalents par litre (donc fortement hypertonique).

Toutes les expériences présentées ont été faites dans ces conditions.

Les points expérimentaux restent assez fixes au cours d'une même expérience, variant assez peu avec les mouvements du sujet, le seul point qu'il faille vérifier est l'apposition correcte des électrodes en face des zones d'érosion et l'humidification suffisante des papiers filtres.

On constate que d'un jour sur l'autre, le lieu se modifie. La résistance à fréquence nulle augmentant les jours qui suivent l'érosion; il en est de même pour l'argument de l'impédance à une fréquence déterminée. Ces modifications ne peuvent venir que d'une variation de la résistance électrodes plans superficiels, l'ensemble des points se décalant vers les basses fréquences lorsque l'âge de la lésion cutanée augmente.

Ce cercle n'est pas centré sur l'axe réel, l'angle varie pour un même sujet entre $76^\circ \frac{1}{2}$ et 79° avec pour valeur moyenne sur 6 expériences : 78° .

2- La variation d'impédance laryngée au cours de la phonation

Les électrodes étant mises en place de la même manière que pour l'établissement du lieu d'impédance au repos, on place le commutateur de l'appareil à cercle pointé sur le pont. L'impédance laryngée constitue alors la branche inconnue du pont de mesure.

L'équilibre du pont est rétabli de sorte que sur l'écran de l'oscilloscope le cercle de rayon nul se traduit par un point.

Comme nous l'avons expliqué précédemment toute variation de l'impédance laryngée entraîne le déséquilibre du pont et l'apparition sur l'écran d'une courbe représentant à fréquence donnée la variation relative de l'impédance : $\frac{\Delta Z}{Z}$.

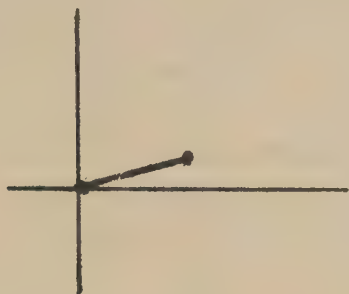
Il est important de distinguer ici deux types de variations d'impédance :

a- les variations lentes qui sont indépendantes de toute phonation et qui peuvent être dues, à la mise en position phonatoire, aux mouvements de déglutition, à la respiration, aux mouvements discrets mais inévitables des électrodes de recueil.

Ces variations lentes, généralement de grande amplitude rendent parfois très difficile l'équilibre correct du pont. Cette instabilité des montages en pont est la raison pour laquelle dans la glottographie, les auteurs préfèrent les montages directs.

b- les variations rapides d'impédances liées à la phonation sont les seules qui nous intéressent ici. Elles s'inscrivent comme un trajet gardant les mêmes caractères pendant toute la durée de l'expérience. Ce trajet est obtenu en demandant au sujet de chanter une voyelle; il n'apparaît qu'avec la phonation pour cesser avec elle.

Si l'équilibre était parfait au moment où le sujet commence à chanter et le restait pendant toute la durée du chant, seul s'inscrirait sur l'écran le trajet correspondant à la variation phonatoire. Il partirait du point 0 du plan complexe.



En fait pendant le cours même du chant et surtout d'une reprise à l'autre, l'équilibre du pont est constamment modifié par les variations lentes d'impédances énoncées plus haut si bien qu'on observe en fait simultanément sur l'écran les variations lentes et les variations rapides.

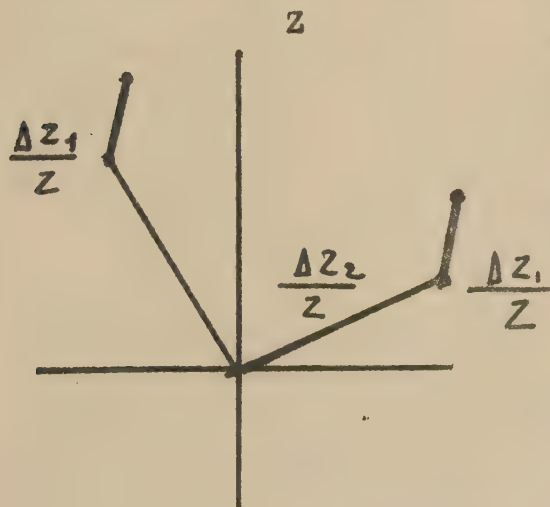
La variation totale ΔZ est égale à la somme des variations partielles :

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2$$

var. rapide	var. lente
----------------	---------------

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta Z_1}{Z} + \frac{\Delta Z_2}{Z}$$

A cette égalité imaginaire, correspond donc une égalité vectorielle, $\frac{\Delta Z}{Z}$ étant le vecteur somme de deux vecteurs.



$\frac{\Delta Z_2}{Z}$ variation lente relative est un vecteur dont le module et l'argument changent sans cesse.

Mais $\frac{\Delta Z_1}{Z}$ variation rapide relative est représentée par le même vecteur, si bien qu'au cours d'une même mesure, chaque fois que le sujet va émettre la même voyelle chantée, apparaît le trajet $\frac{\Delta Z_1}{Z}$ sous forme de

vecteurs équipollents disséminés dans le plan complexe.

Fig. 39

Ainsi dans la mesure où la variation relative d'impédance reste faible, il n'est pas nécessaire que l'équilibre du pont soit parfait pour que le trajet de $\frac{\Delta Z}{Z}$ (variation phonatoire)

garde même module et même argument. Cette dispersion sur toute la surface de l'écran évite au contraire la superposition des images lorsque l'on photographie le phénomène. Les clichés pris au 1/25^e de seconde, ne sont impressionnés que par les variations rapides. Les variations lentes se traduisent par un léger voile qu'il est facile de reconnaître après projection.

Le dépouillement de ces clichés permet de reconnaître à la variation phonatoire un certain nombre de caractères.

1- La forme du trajet, chez un même sujet ne dépend pas de la hauteur de la note émise, mais seulement du registre sur lequel est chantée la voyelle. En voix de poitrine le trajet de l'aller est le même que celui du retour. Il n'y a pas de boucle. Il est pratiquement rectiligne, parfois incurvé en S italique à ses extrémités. En voix de fausset, le trajet est plus compliqué, formant souvent une boucle (trajet du retour différent de l'aller).

2- La longueur du trajet traduit directement la profondeur de la modulation. On retrouve avec cette méthode des résultats identiques à ceux de la glottographie simple : la profondeur de modulation est beaucoup plus faible en voix de fausset. En voix de poitrine elle est de l'ordre du millièème et son amplitude dépend de la note émise.

Il est donc très difficile en raison de leur forme et de leur peu d'amplitude d'étudier les trajets observés en voix de fausset. L'interprétation est encore plus compliquée car il faudrait invoquer pour expliquer la boucle, la variation non synchrone d'au moins 2 paramètres du schéma électrique équivalent.

Nous étudierons donc essentiellement dans ce travail les variations d'impédance observées en voix de poitrine. On mesurera la direction moyenne du trajet après avoir mis bout à bout les trajets équipollents, enregistrés sur un même cliché, à une fréquence donnée.

Cette direction moyenne constitue dans les tableaux suivants ce qu'on appelle la phase expérimentale de $\frac{dZ}{Z}$

Nous présentons ci-contre l'ensemble de nos résultats expérimentaux : 8 expériences complètes, comprenant les variations relatives d'impédance à 4 fréquences et les lieux expérimentaux, faites sur 2 sujets différents. La nécessité d'araser l'épiderme, le caractère assez délicat de ces expériences, et la concordance d'ensemble de ces séries de mesures, expliquent que nous n'ayons pas fait d'essais plus nombreux.

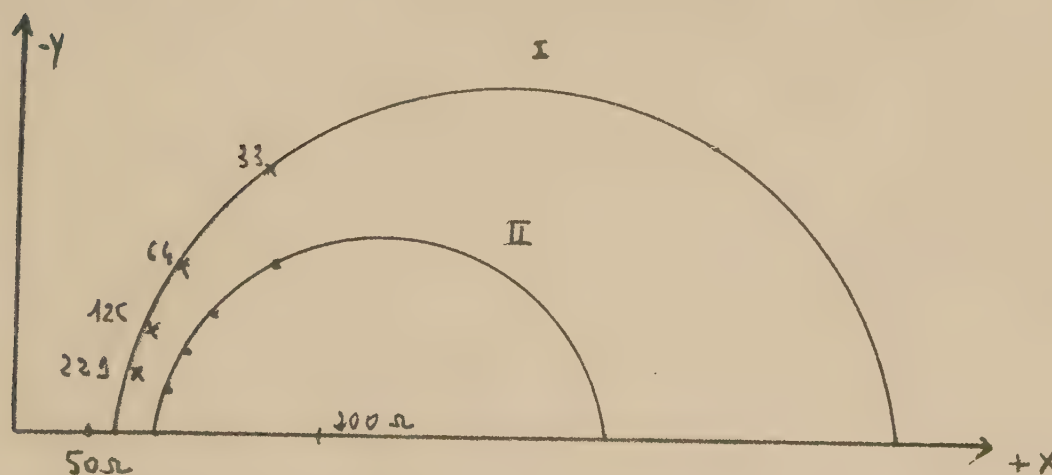
IMPEDANCE DU MUSCLE DE GRENOUILLE

En vue d'une interprétation des schémas électriques équivalents au larynx qui feront intervenir des impédances musculaires, nous avons été amenés à faire quelques mesures sur du muscle isolé de grenouille, tout en sachant qu'il n'avait sans doute pas les mêmes caractéristiques que les muscles des cordes vocales.

1- Lieu d'impédance

Un cube musculaire d'environ 1 cm de côté était placé entre 2 électrodes identiques (0,8 c-2) dont on peut régler la pression.

La première figure donne les lieux d'impédance, les fibres étant perpendiculaires aux lignes de courant (Fig.1) La lieu II est celui du même muscle, les fibres étant cette fois-ci parallèles aux lignes de courant.



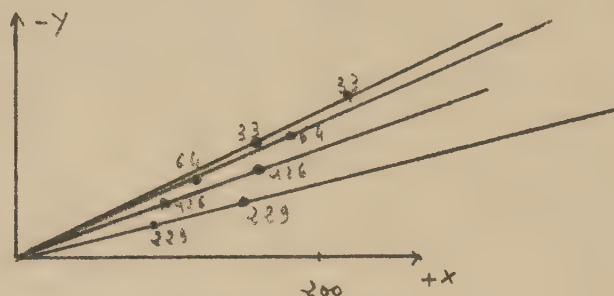
2- Influence de la pression

Si les lignes de courant sont parallèles aux fibres musculaires, l'affixe à fréquence donnée se déplace sur une parallèle à l'axe des X. Cela peut être interprété comme une variation d'une résistance série.

Le trajet n'est plus parallèle quand la pression varie, si les lignes de courant sont perpendiculaires aux fibres.

3- Influence de l'épaisseur du muscle

Les lignes de courant sont perpendiculaires aux fibres.
Les 2 lieux sont homothétiques dans le rapport d'épaisseur
Ceci confirme qu'une substance donnée conserve une impédance
homothétique quelle que soit son épaisseur à condition d'être
attaquée de la même façon par les lignes de courant.

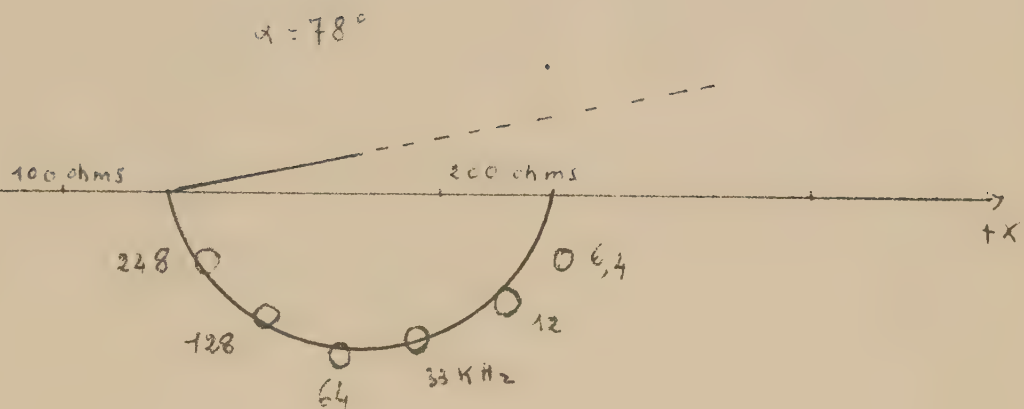


4- L'angle de phase disparaît après adjonction de quelques gouttes de SO_4H_2 qui détruisant la membrane, en annule la capacité. La résistance d'un tel muscle mort est alors purement ohmique, 50 à 70 ohms pour 1 cm d'épaisseur, et 0,8 cm² de surface d'électrode.

- 64 A -

1 Février

sujet L.G.
peau érodée

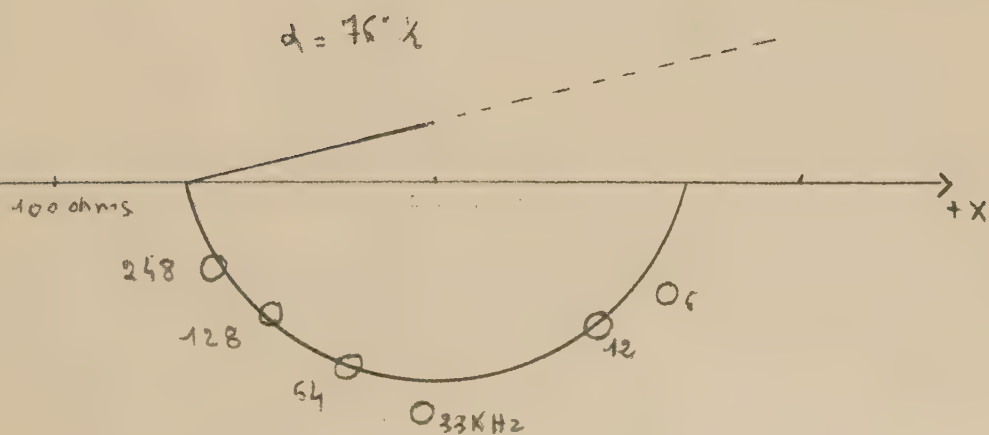


lieu relevé au crayon et agrandi optiquement.

Exp. 1

2 Février

sujet L.G.
peau érodée



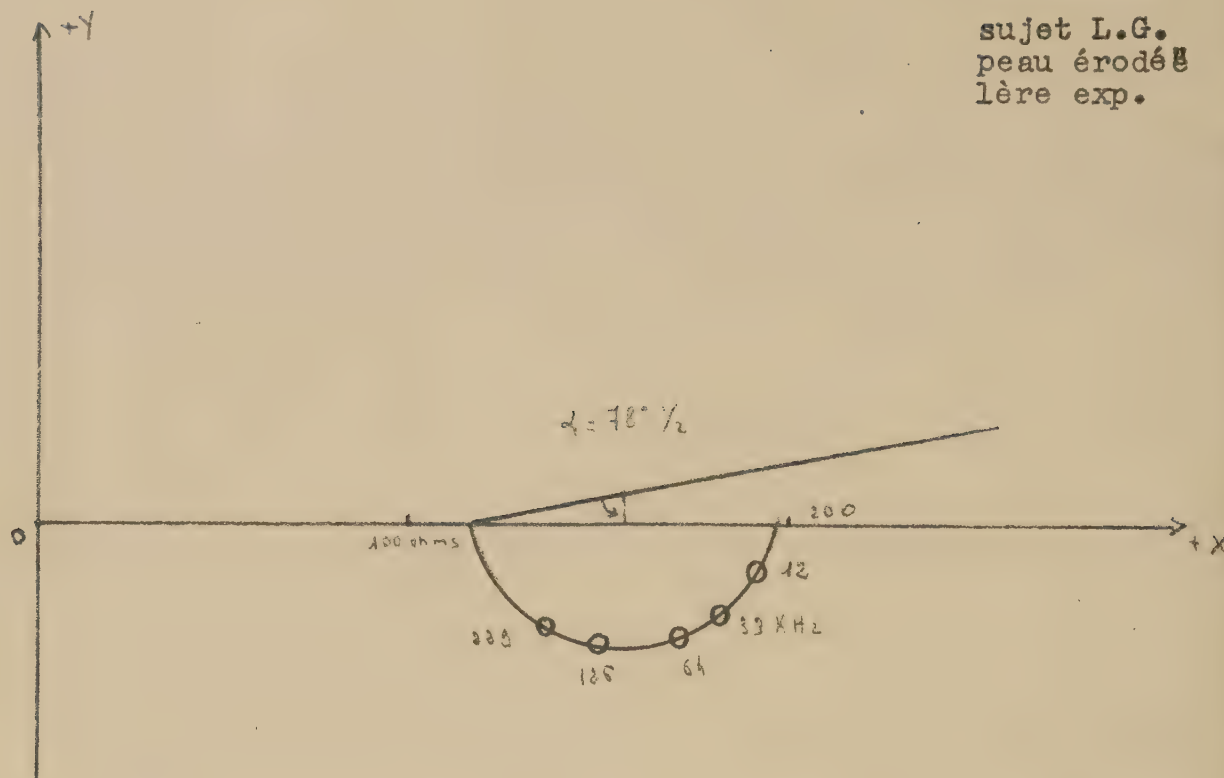
agrandissement optique du lieu relevé au crayon

Exp. 2

- 64 B -

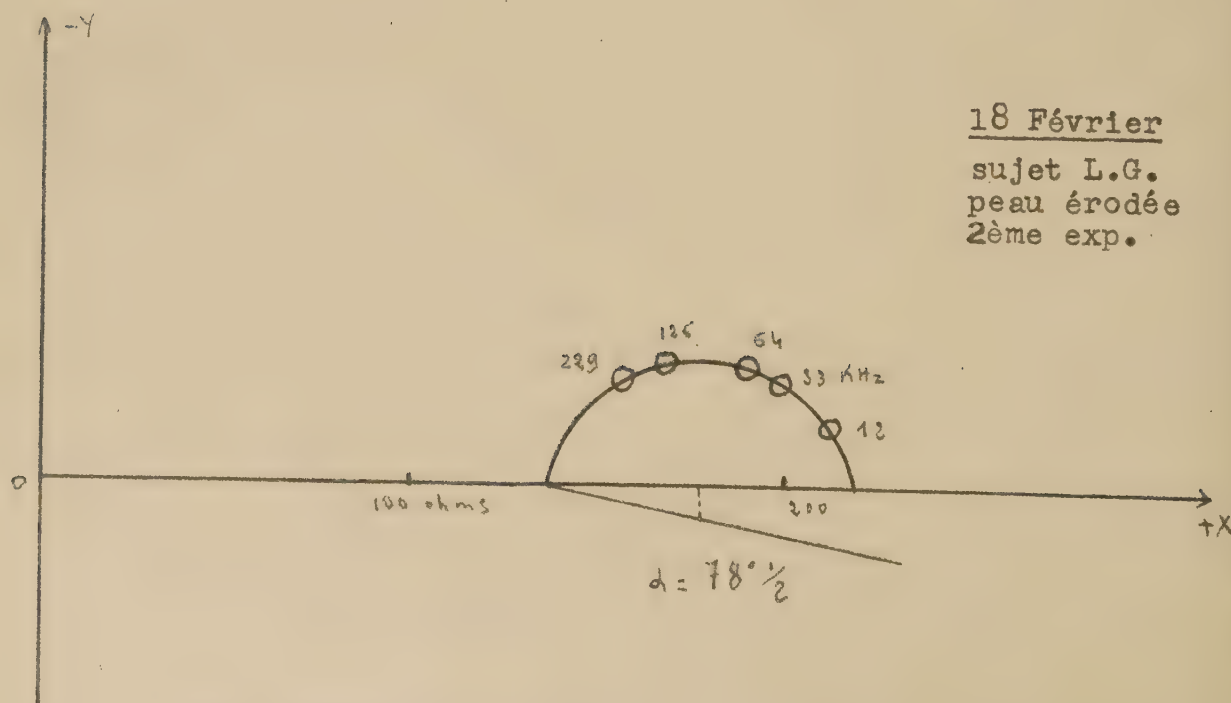
18 Février

sujet L.G.
peau érodée
lère exp.



lieu (agrandissement optique)

Exp. 3



18 Février

sujet L.G.
peau érodée
2ème exp.

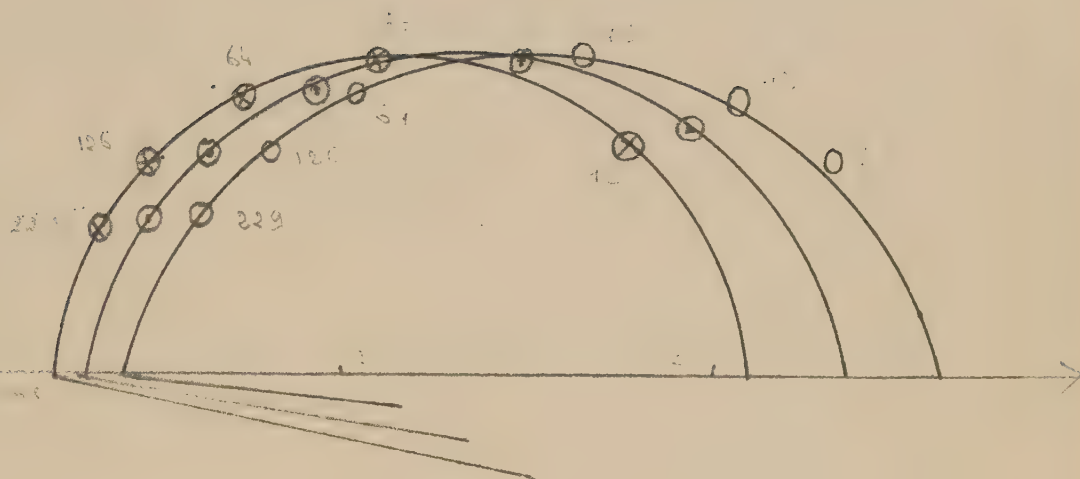
lieu agrandi optiquement

Exp. 4

- 64 c -

20 Février

sujet L.G.
peau érodée
3ème jour

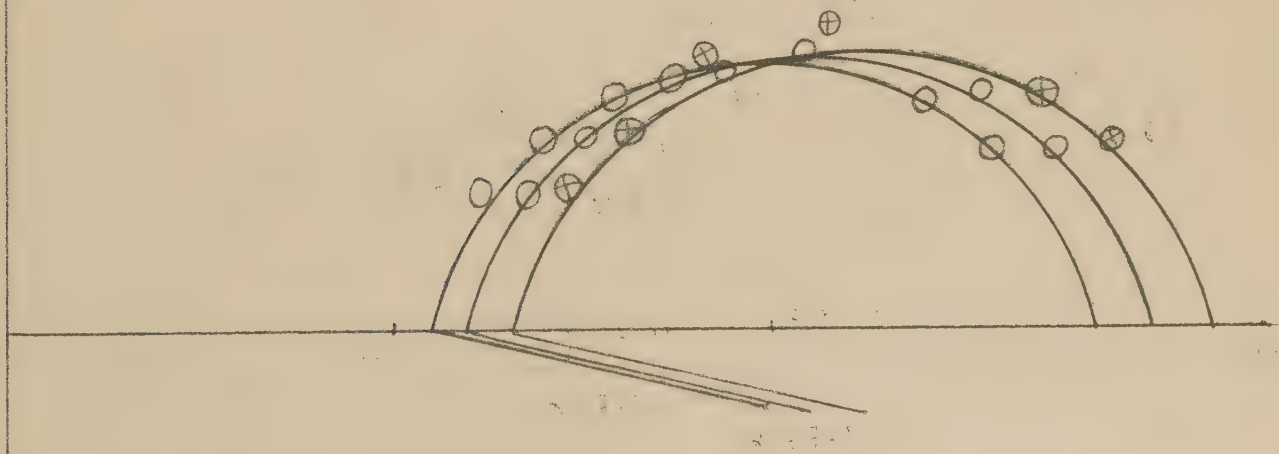


$\alpha = 84^\circ$ $\otimes$ lieu avant mesures en pont
 $\alpha = 78^\circ$ $\circ$ " après " "
 $\alpha = 79^\circ \frac{1}{2}$ moyenne des deux $\otimes$

Exp. 5

22 Février

sujet L.G.
peau érodée
4ème jour

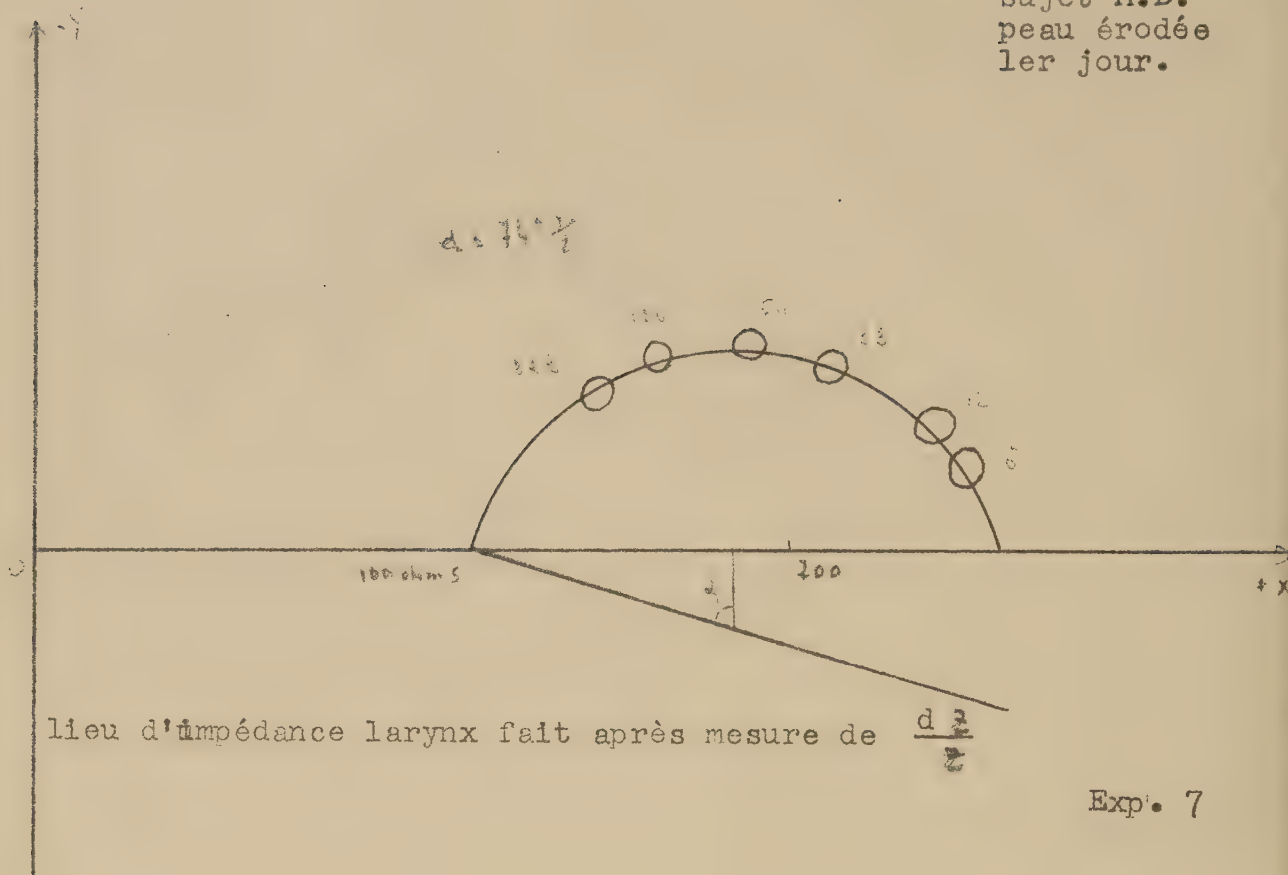


$\circ$ lieu avant la mesure de $\frac{dz}{z}$
 $\otimes$ lieu après

Exp. 6

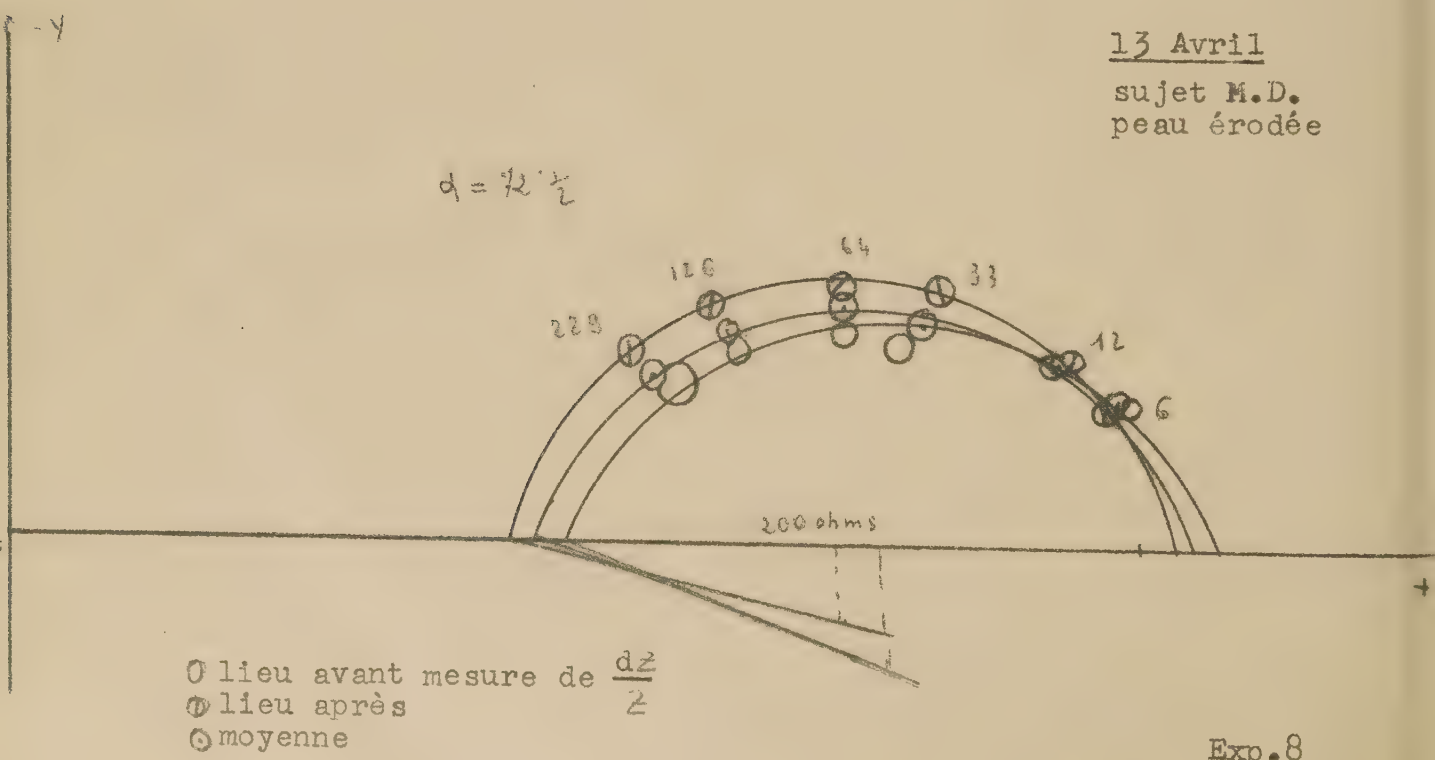
12 Avril

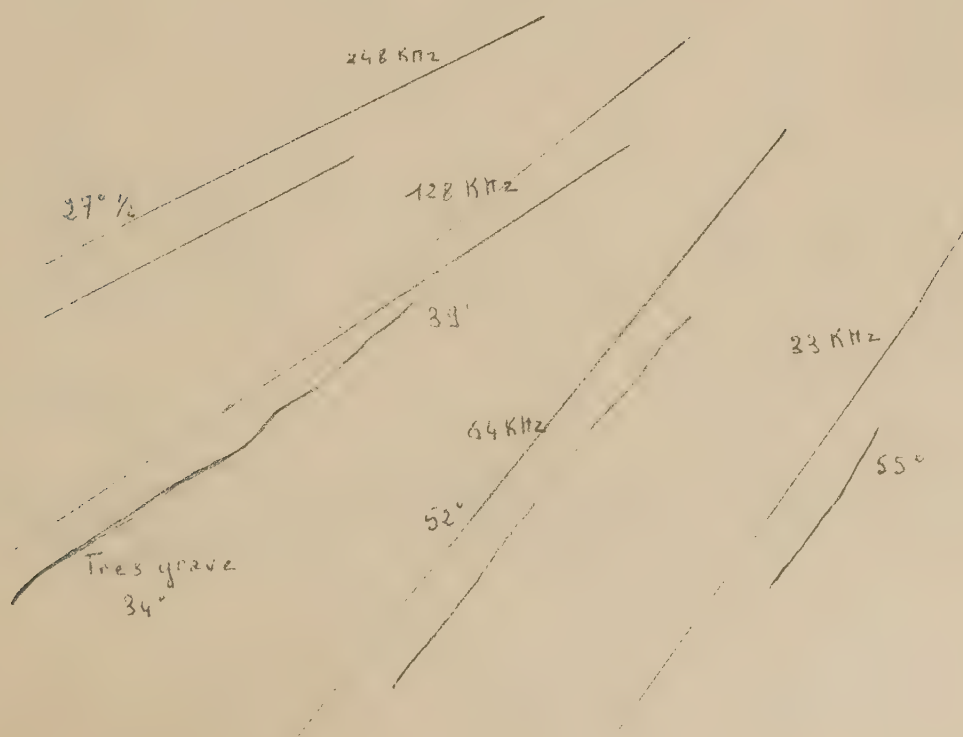
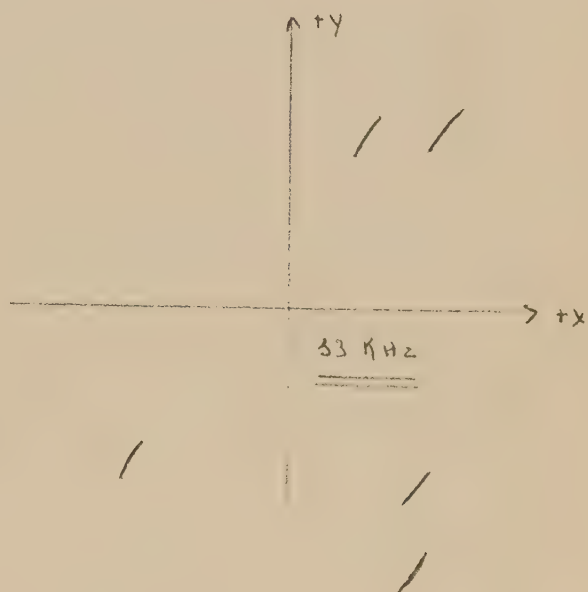
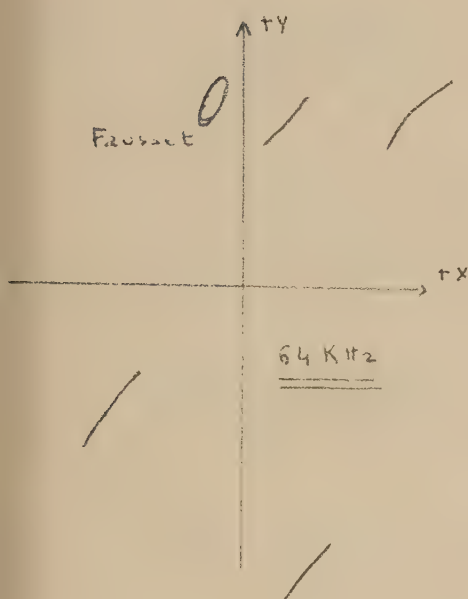
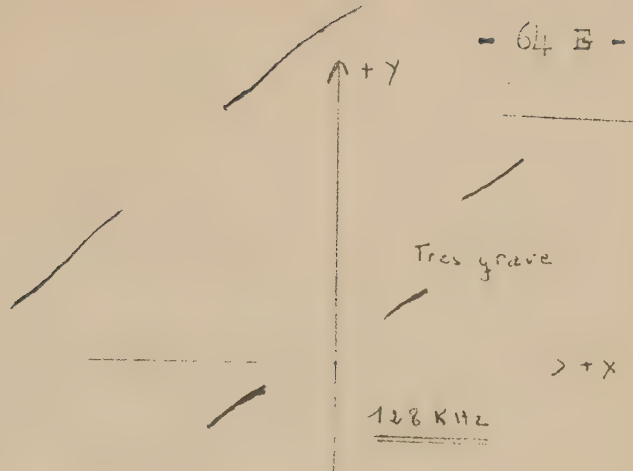
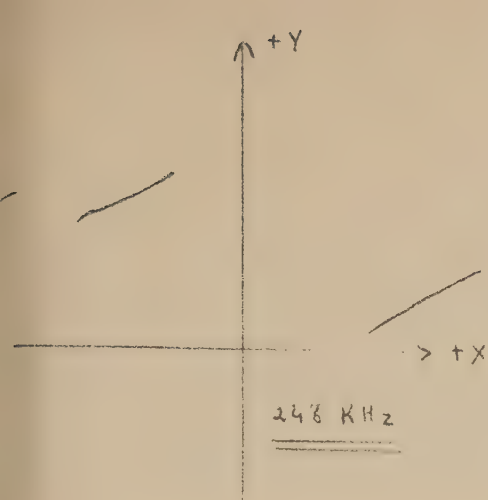
sujet M.D.
peau érodée
1er jour.



13 Avril

sujet M.D.
peau érodée





LES DIFFERENTES HYPOTHESES.

Le schéma électrique équivalent du larynx doit pour être admis, satisfaire à plusieurs conditions.

- Son lieu d'impédance aux diverses fréquences ne doit donc pas différer beaucoup d'un arc de cercle.

- Les différents éléments électriques entrant dans sa constitution, résistance ohmique, capacité statique ou de polarisation, doivent correspondre le plus possible aux éléments anatomiques et cela également au point de vue quantitatif.

- La variation de l'un ou plusieurs de ces éléments électriques constitutifs doit reproduire aussi fidèlement que possible la variation relative d'impédance observée par le dispositif de mesure et ceci tant pour le module que pour la phase, et à chacune des fréquences étudiées.

Seuls éléments actifs pendant la phonation, les cordes vocales sont à l'origine de la variation d'impédance laryngée, c'est pourquoi l'interprétation que l'on donnera du glottogramme doit recouper les renseignements fournis par l'étude directe de la cinématique des cordes.

Dans l'ignorance où nous étions au sujet du mécanisme exact de cette variation d'impédance, L. Gougerot avait d'abord fait jouer un rôle prédominant à la capacité glottique dont les cordes vocales constituent les deux armatures (8): leur rapprochement et leur éloignement pendant la phonation venant modifier la valeur de cette capacité et par conséquent la valeur globale de l'impédance laryngée.

Mais si l'on admet que lors de l'accolement des cordes l'impédance de cette capacité est nulle et que l'on calcule l'impédance de cette capacité lorsque les cordes sont écartées on constate que la variation d'impédance est énorme, ce qui a priori est difficilement compatible avec la faible amplitude de modulation habituellement observée, à moins que cette capacité ne soit shuntée par des impédances très faibles.

Cette capacité glottique varie :

- d'une valeur infinie quand les cordes sont au contact en voix de poitrine.

- à une valeur minimum C_0 quand la glotte est béante, c'est à dire quand l'élongation x entre les cordes vocales sera maxima. Nous appellerons X_0 cette élongation maxima.

Si S est la surface de la tranche des cordes vocales, on aura en unités ESCGS :

$$C_{cm} = \frac{S}{4\pi x}$$

car le diélectrique est l'air.

Soit, à un coefficient $\frac{10}{9}$ près, en Farads :

$$C_{farads} = \frac{S \cdot 10^{-12}}{4\pi x}$$

L'impédance correspondante aura pour expression :

$$\frac{1}{C\omega} = \frac{4\pi x \text{ cm}}{S \text{ cm}^2} \cdot \frac{10^{12}}{2\pi N_{\text{Herts}}} = \frac{2 \cdot 10^9}{S \text{ cm}^2 N \cdot (\text{KHz})} x \text{ cm} = k \frac{x}{N}$$

Si S est estimé au plus à 1 cm^2 (corde de 1,5 cm de longueur et de 0,6 cm d'épaisseur, ce qui est beaucoup, $S = 0,9 \text{ cm}^2$ admettons 1 cm^2).

La valeur maximale de l'élongation x est de l'ordre du millimètre.

Donc $\frac{1}{C_0 \omega}$ valeur maximale du module de l'impédance

sera :

$$\frac{1}{C_0 \omega} = \frac{0,2 \cdot 10^9}{N \text{ en KHz.}}$$

Ce qui donne pour les quatre fréquences expérimentales en arrondissant :

N_{KHz}	248	128	64	33
$\frac{1}{C_0 \omega}$	0,8	1,5	3	6

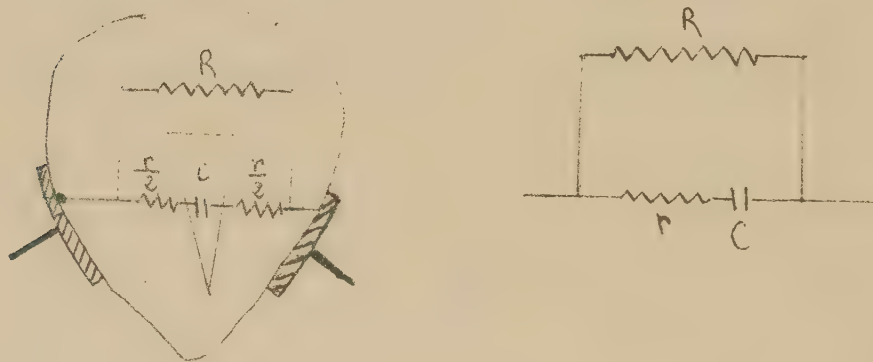
en Mégohms

La variation du module de cette impédance est donc énorme depuis une valeur nulle (cordes jointives) à quelques mégohms lors de l'ouverture complète de la glotte.

Si cette impédance capacitive était supposée directement en parallèle sur l'impédance des plans postérieurs aux cordes vocales, cela entraînerait des variations relatives d'impédance $\frac{\Delta Z}{Z}$ qui seraient très élevées, or c'est le contraire qui est observé.

Il faut donc supposer que C est en série avec une impédance suffisamment élevée pour diminuer l'influence de la variation capacitive (de même que nous avons inséré une résistance en série dans notre modèle avec lampe à réactance).

On arrive ainsi au plus simple des schémas : Un modèle de Fricke à capacité statique comme le suggère aussi le diagramme d'impédance circulaire recueilli expérimentalement.



R représenterait la résistance des plans profonds
r la résistance des C.V.
C la capacité glottique

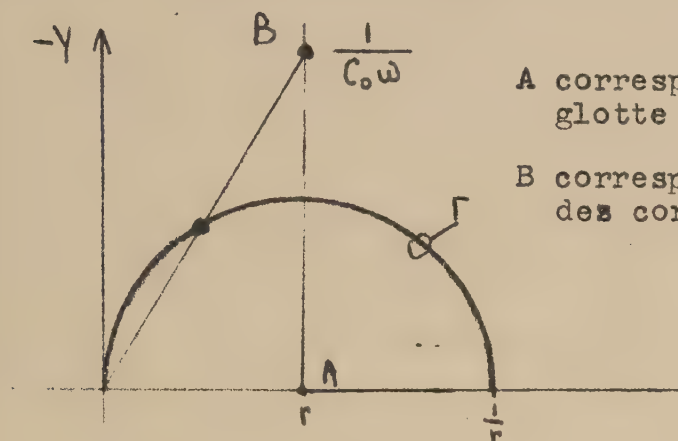
Fig. 40.

Ce modèle est-il capable de rendre compte des faits observés? Etudions pour cela quelle serait la conséquence d'une variation de la capacité.

Comme cette variation, nous y avons insisté, est très importante, il ne saurait être question de la traiter comme une différentielle; Il faut utiliser la méthode géométrique.

$$z = r + \frac{1}{jC\omega}$$

- Le lieu de z , à fréquence donnée, quand C varie d'une valeur infinie (cordes jointives) à une valeur minima (glotte ouverte), est une verticale élevée à l'abscisse r .



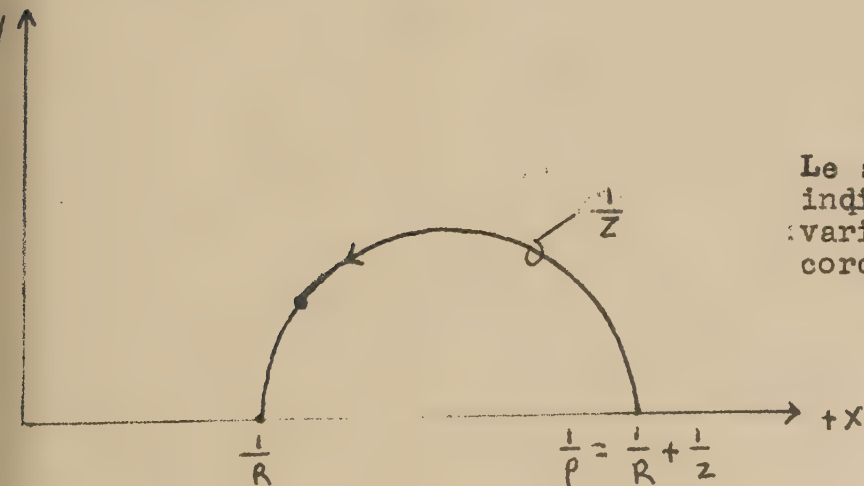
A correspond à la fermeture de la glotte

B correspond à l'élongation maxima des cordes.

Fig. 41.

- Le lieu de $\frac{1}{Z}$ sera donc une portion de cercle (Γ) passant par l'origine, centré sur l'axe réel (d'autant plus longue que ω , donc la fréquence de travail est plus basse).

- Le lieu d'admittance du modèle complet c'est à dire de $\frac{1}{Z}$ sera cette même portion de cercle ayant subi une translation de $\frac{1}{R}$.



Le sens de la flèche indique le sens de la variation quand les cordes s'écartent.

Fig. 42.

- Enfin, le lieu de Z quand C varie, c'est à dire le lieu de ΔZ , sera l'inverse du cercle précédent, donc un autre cercle Γ' .

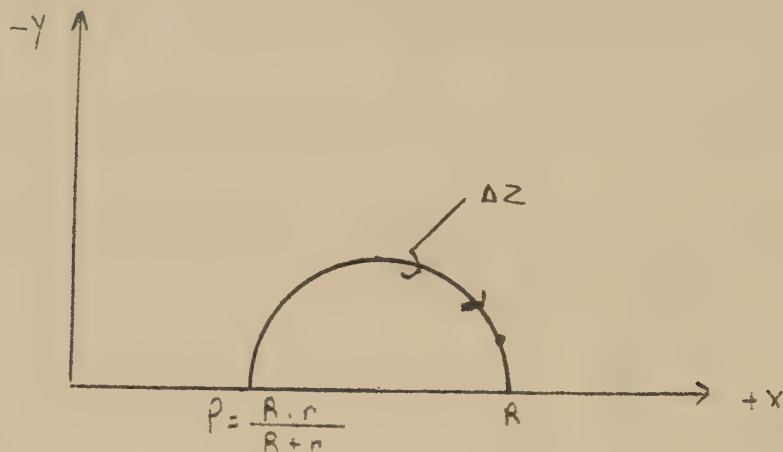


Fig. 43.

Si $r \gg R$, c'est à dire si la résistance des cordes vocales était beaucoup plus élevée que R résistance des plans postérieurs (ce qui au point de vue anatomique serait tout à fait vraisemblable), la quantité ρ représentant la valeur de r en parallèle avec R , deviendrait très peu différente de R : le diamètre du cercle Γ' diminuerait; d'autre part Z serait alors très peu différent de R , si bien que $\frac{\Delta Z}{Z}$ à une homothétie près devrait avoir le même trajet circulaire.

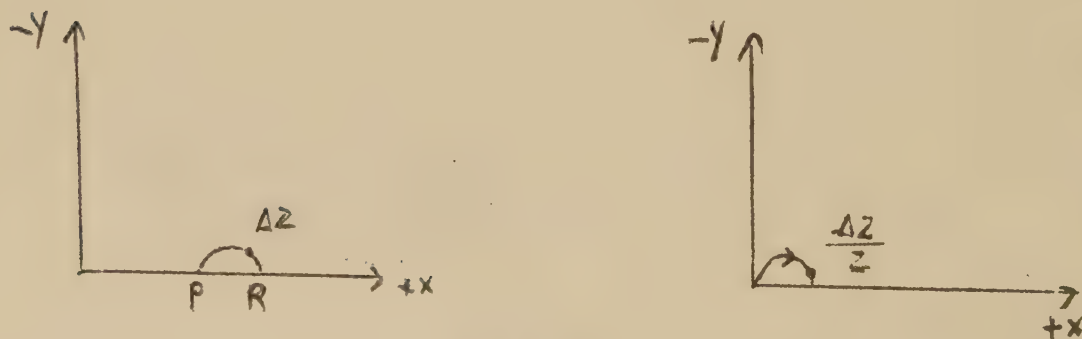


Fig. 44.

Or en voix de poitrine, nous n'avons jamais observé d'arc de cercle même à 33 KHz où il devrait être le plus marqué, mais un trajet pratiquement rectiligne, légèrement incurvé et parfois en *s* italique.

Ce premier modèle est donc inacceptable.

On a donc envisagé un second modèle à partir d'une coupe horizontale passant par les cordes vocales; en imaginant les différents trajets des lignes de courant suivant les tissus rencontrés.

1- On admettra que la peau érodée sous les électrodes se confond avec le tissu cellulaire sous-cutané; de faible épaisseur et de très faible résistance aux fréquences élevées choisies. Ce plan cutané contribue donc à une résistance pure série.

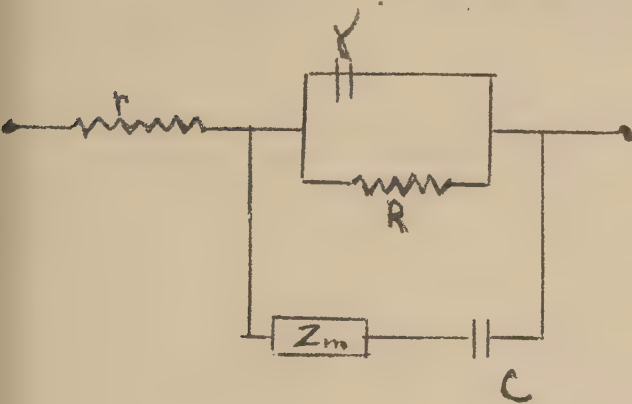
2- Le cartilage constitue une impédance qui vient se mettre en série

3- L'ensemble musculo-conjonctif situé en arrière du larynx constitue une impédance en série avec les précédentes.

4- La capacité laryngée pleine d'air, constitue une impédance pratiquement infinie en parallèle sur la précédente.

5- Les cordes vocales constituent une impédance musculo-conjonctive en série avec la capacité glottique.

Ainsi, le modèle au repos serait le suivant :



r résistance série de la peau et du cartilage

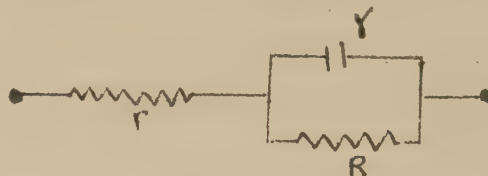
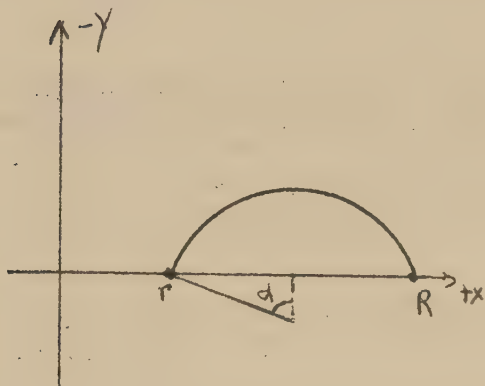
R shuntée par χ forment z_0
impédance musculo-
conjonctive postérieure

C capacité glottique

Z_m impédance des cordes vocales.

Fig. 45

Comme au repos la glotte étant ouverte, C représente une impédance très grande, presque infinie, on peut la supprimer dans le modèle au repos qui peut être considéré comme un modèle de Philipppson Cole expliquant l'allure du lieu d'impédance expérimental.



r de l'ordre de 150 ohms

R " " "

$\alpha \sim 70^\circ$

$\Gamma \sim 2 \cdot 10^{-7}$ unités pratiques

Ces valeurs ont été déduites du lieu expérimental par extrapolation à fréquence nulle et fréquence infinie.

Fig. 46.

Le fait de considérer l'impédance globale (cordes vocales capacité glottique) comme une impédance très grande en parallèle sur celle des tissus postérieurs permet d'expliquer la faible profondeur de modulation alors que la capacité glottique varie énormément.

Il faudrait donc dans ce schéma que l'impédance Z_m des cordes vocales en série avec C, fût très grande; C'est cette grande impédance des cordes vocales qui paraît incompatible avec les données anatomiques.

dans la corde vocale

On peut en effet distinguer 3 parties en allant de la périphérie vers le centre :

1- une partie musculaire dont l'impédance est faible : les mesures faites sur le muscle de grenouille ont donné des valeurs de l'ordre de 50 ohms.

2- Le ligament vocal ne doit pas non plus avoir une grande impédance : on trouve pour valeur de la résistance d'un tendon d'animal des chiffres ne dépassant pas 200 ohms à égalité de surface et d'épaisseur.

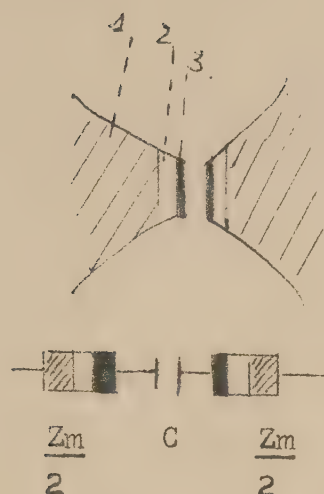


Fig. 47.

3- La muqueuse, épithélium pavimenteux, dont nous avons essayé d'estimer l'impédance qui ne doit pas être très différente de celle de la muqueuse buccale mesurée à la face interne des lèvres.

On a mesuré l'impédance de cette muqueuse par la méthode de Barnett, avec 2 petites électrodes concentriques. Les chiffres trouvés restent faibles : rapportés à 1 cm² de surface on trouve 68 ohms à 229 KHz et 136 ohms à 33 KHz.

L'impédance des cordes constituée de ces 3 tissus en série ne peut donc dépasser 400 Ohms.

Ainsi, pas plus que le premier, ce schéma n'est compatible avec les données anatomiques, physiologiques et électriques du problème.

Du reste, quelles que soient les combinaisons envisagées dès l'instant que le schéma comprend des résistances et une capacité susceptible de varier dans les limites qui nous sont imposées, le trajet de $\frac{\Delta Z}{Z}$ ne peut être qu'un arc de cercle,

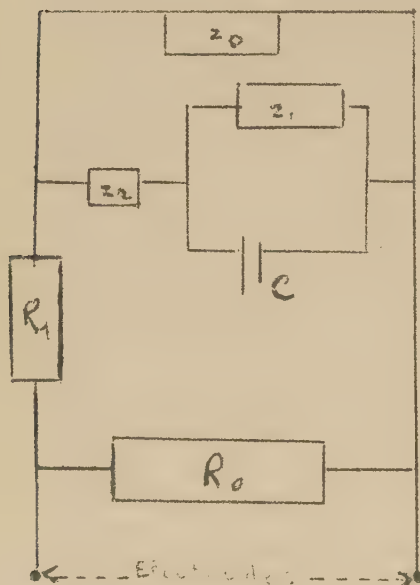
atteignant presque toujours le demi-cercle et cela, si petit que puisse être son diamètre.

C'est pourquoi il est nécessaire d'envisager une autre variable que la capacité glottique.

Après divers essais, on a été amené à supposer une variation série dans l'impédance des cordes vocales, à l'intérieur d'un modèle un peu moins schématique que le précédent tout en sachant qu'il est encore extrêmement simplifié. Tous ces schémas en effet, ne peuvent être qu'une caricature, si l'on ne veut pas aboutir à des calculs vite ~~inextricables~~.

En réalité toutes ces impédances non homogènes, artificiellement séparées, sont en fait interconnectées. Il faudrait donc à leur égard raisonner comme on le fait dans l'étude des lignes à constantes réparties, si bien que les branchements que nous ferons, révéleront toujours une assez grande part d'arbitraire.

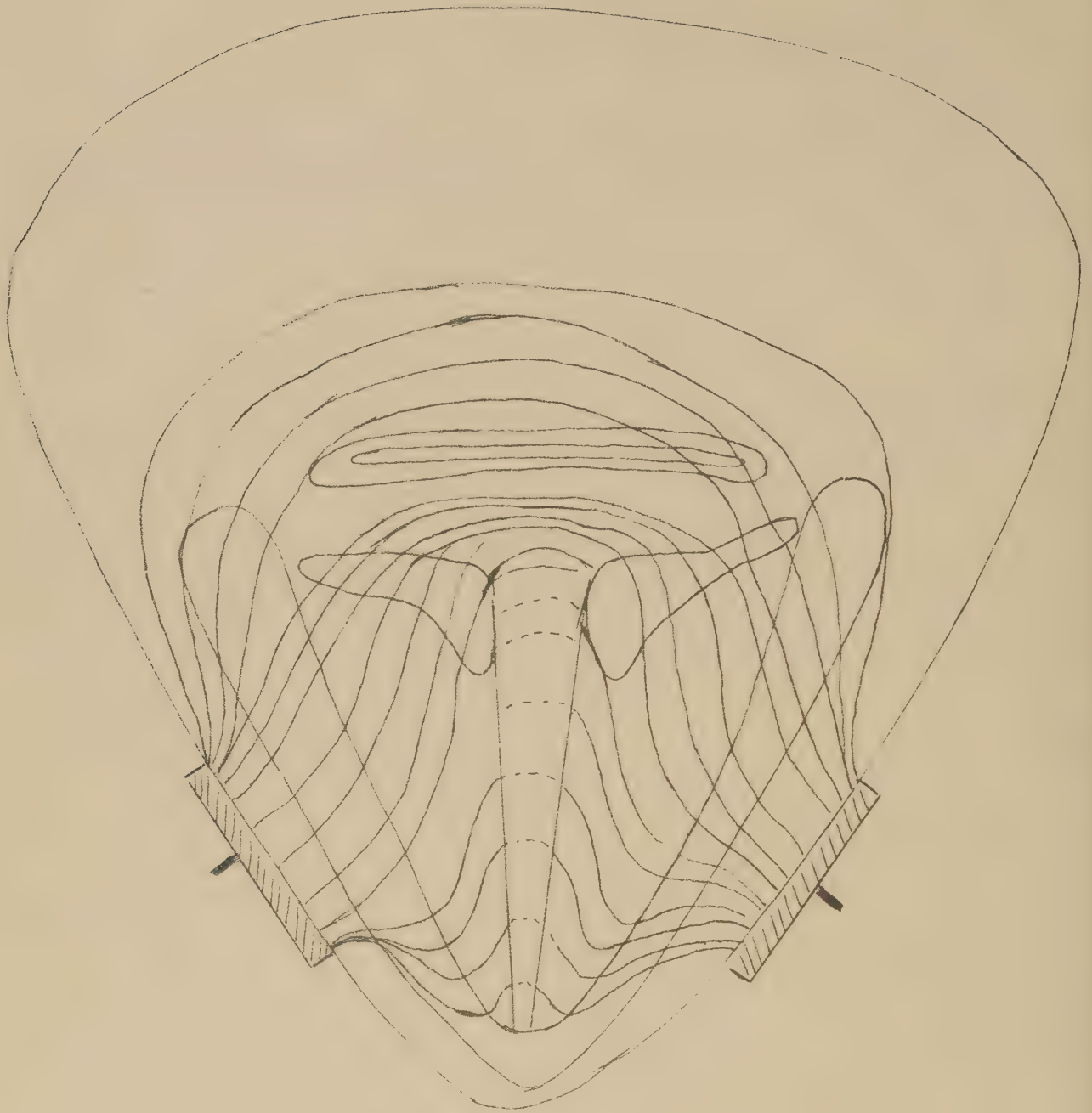
Ce 3ème modèle, au repos, comprend l'association des impédances suivantes :

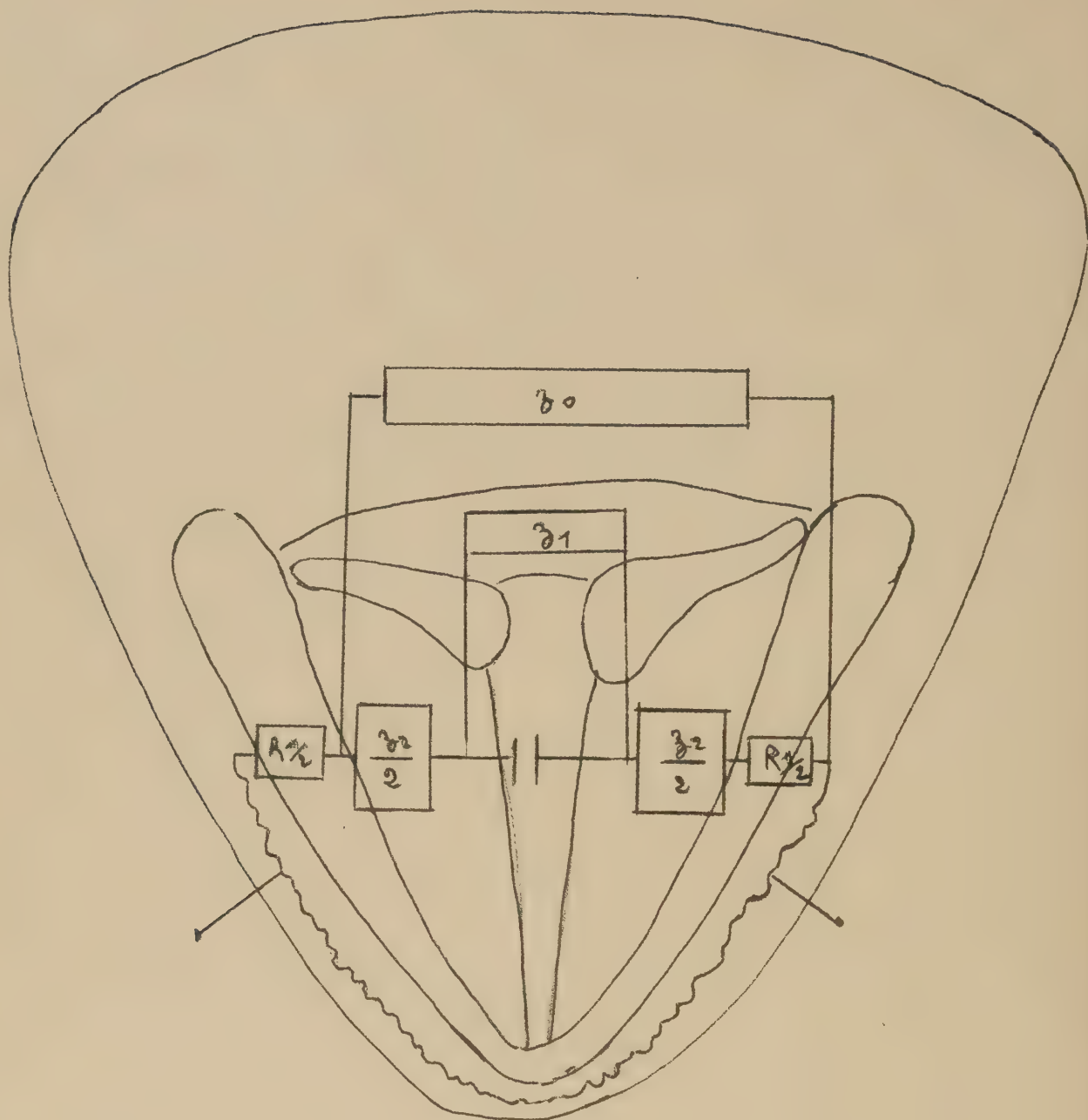


- C capacité glottique
- z_1 plan musculaire laryngé postérieur
- z_2 impédance musculo-ligamentaire des cordes vocales
- z_0 impédance musculo-aponévrotique des plans postérieurs.
- $\frac{R_1}{2}$ impédance des plans antero-latéraux superficiels (y compris le cartilage) assimilée à une résistance ohmique comme l'a montré une mesure directe sur cartilage dont la résistance est d'ailleurs faible.
- R_0 impédance des plans musculo-aponévrotiques antérieurs. On pourra l'assimiler à une résistance ohmique car le tissu conjonctif prédomine largement.

Fig. 48.

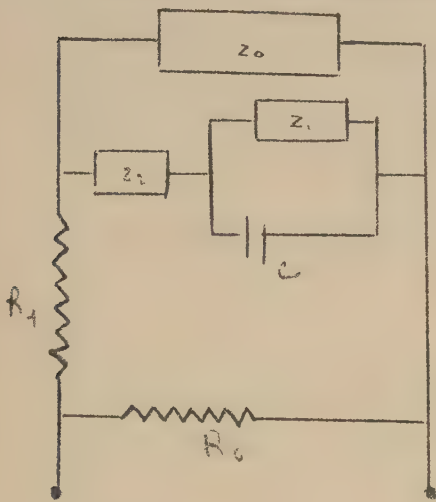
On appellera Z l'impédance de l'ensemble.





La coupe ci-jointe (fig.48) indique la correspondance anatomique des différentes impédances.

On conviendra d'introduire les notations suivantes :
un élément A en parallèle avec un élément B sera noté :A // B.



$$\begin{aligned} Z_2 &= z_2 + z_1 // C \\ Z_1 &= z_0 // Z_2 \\ Z_2 &= R_1 + Z_1 \\ \frac{1}{Z} &= \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R_0} \end{aligned}$$

Fig. 49.

Nous avons calculé la variation relative d'impédance $\frac{dZ}{Z}$ de ce modèle quand Z_2 varie de ΔZ_2 , sans préjuger de la nature de cette variation. Nous analyserons ensuite quelles sont les composantes de ΔZ_2 et l'importante respective qu'il faut leur donner.

	$Z_2 = z_2 + z_1 // C$		
Dans Z_1 seul Z_2 varie	$Z_1 = z_0 // Z_2$	$dZ_1 = \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \cdot dZ_2$	
Dans Z_2 seul Z_1 varie	$Z_2 = R_1 + Z_1$	$dZ_2 = dZ_1$	$dZ_2 = \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \cdot dZ_2$
Dans Z seul Z_2 varie	$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R_0}$	$\frac{dZ}{Z} = \frac{Z}{Z_2^2} \cdot \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \cdot dZ_2$	

Nous ferons l'hypothèse que z_0 , z_1 et z_2 sont des impédances homothétiques. Ces 3 impédances représentent en effet essentiellement des impédances musculaires. Nous avons vu certes, que pour pouvoir être considérées comme homothétiques, de telles impédances devaient être en toute rigueur parcourues de façon identique par les lignes de courant. Ce cas idéal n'est pas réalisé ici, mais si l'on admet un certain hasard dans l'orientation des fibres (en raison de la diversité des faisceaux musculaires laryngés) on retombe dans le cas d'un système à impédance isotrope.

Dans ces conditions, au repos, C capacité glottique a une impédance très grande et :

$$Z_2 \approx z_2 + z_1$$

la somme de deux impédances homothétiques est une impédance qui leur est respectivement homothétique, et Z_2 est homothétique à z_2 , à z_1 et par conséquent à z_0 .

Par ailleurs z_1 ayant été posé comme égal à $z_0 // z_2$ la mise en parallèle de deux impédances homothétiques donnera également une impédance homothétique.

On en déduit que z_1 est homothétique à z_2 .

Comment maintenant estimer ces coefficients d'homothétie?
En jugeant de l'importance de ces impédances d'après les données anatomiques.

- z_2 impédance musculaire des cordes vocales est beaucoup plus grande que z_0 impédance des plans musculaires postérieurs du cou par lesquels vont passer la majeure partie des lignes de courant. On aura donc : $z_2 = K_1 z_0$ avec $K_1 \gg 1$

- z_2 est sans doute également plus grande que z_1 qui représente le plan laryngé postérieur s'étalant sur toute la hauteur du cou, offrant donc plus de passage aux lignes de courant que la saillie peu haute des cordes vocales: donc $z_2 = K_2 z_1$. On pourra donc poser $K_2 \gg 1$ en sachant que ce point resterait à priori très discutable si les résultats expérimentaux n'en avaient pas montré à posteriori l'absence de contradiction.

- Ceci nous amène à une nouvelle approximation légitimée par le raisonnement précédent :

$$Z_2 \approx z_2 + z_1 \quad \text{comme } z_1 \ll z_2$$

$$Z_2 \approx z_2$$

En reportant ceci page 74, on obtient :

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{z_0} + \frac{1}{Z_2} \approx \frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_2} \approx \frac{K_1 + 1}{z_2}$$

$$\frac{Z_1}{z_2} \approx \frac{z_1}{z_2} \approx \frac{1}{K_1 + 1}$$

D'où :

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{Z}{z_2^2} \cdot \frac{1}{(K_1 + 1)^2} \cdot dZ_2$$

Voyons maintenant quels sont les éléments susceptibles de varier dans Z_2 .

- soit une résistance appartenant à z_2
- soit la capacité C en parallèle sur z_1

Ces variations de capacitance étant très grandes, de 0 à plusieurs mégohms, on pourra pas traiter $\Delta Z_{2(c)}$ comme une différentielle; il pourrait alors paraître curieux que dZ soit toujours considéré comme une différentielle : on peut montrer que la petitesse de z_1 shuntant C autorise de le faire à partir de dZ_1 .

On utilisera la méthode géométrique suivante :

- z_1 impédance musculaire aura une portion de cercle pour lieu d'impédance (cercle ne passant pas par l'origine du fait de la résistance série).

- le lieu de $\frac{1}{z_1}$ sera donc également un cercle.

Sur le graphique, on peut choisir pour la commodité, le rapport d'inversion tel que le cercle se transforme en lui-même, c'est à dire que le lieu d'admittance et le lieu d'impédance soient confondus, le point B est alors l'inverse de A (ce qui revient à choisir convenablement les unités sur les axes).

Quand C varie, le lieu d'admittance de z_1 shuntée par C , sera donc à fréquence donnée, une droite élevée verticalement en B représentant :

$$\frac{1}{z_1} + jC\omega$$

Si z_1 est donc très inférieure à la variation de résistance que nous sommes obligés d'admettre, c'est que z_1 est lui-même très petit. Le schéma va dès lors se simplifier, permettant la poursuite des calculs.

Le schéma simplifié :

puisque $z_1 \approx 0$

Le schéma de la figure 49 devient : (figure ci-contre)

z_0 et z_2 sont, on l'a vu, homothétiques. Leur mise en parallèle donnera une impédance homothétique que l'on appellera Z_1

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_2}$$

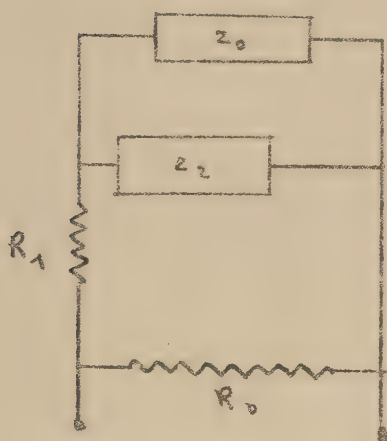
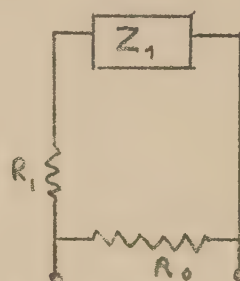


Fig. 5I.



Z_1 sera une impédance musculaire, représentable par un Philipponson Cole dont :

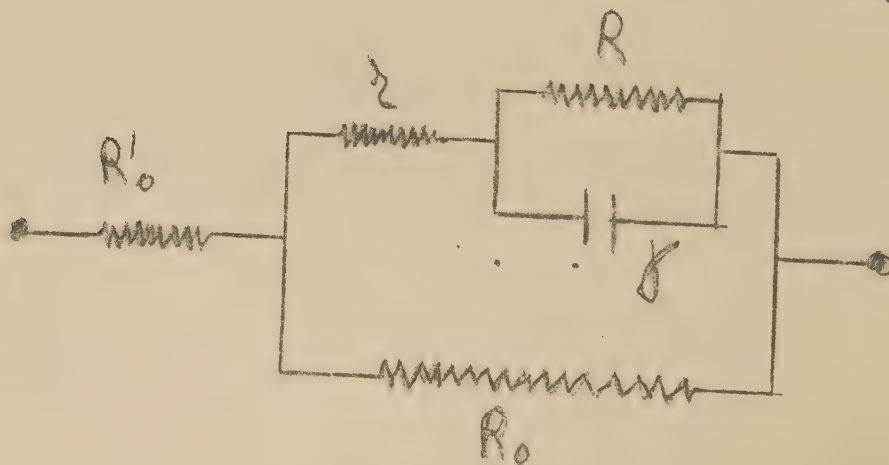
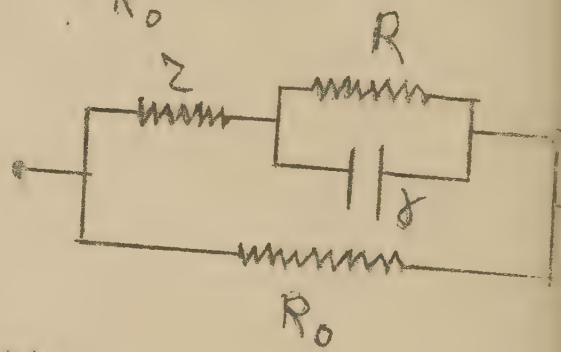
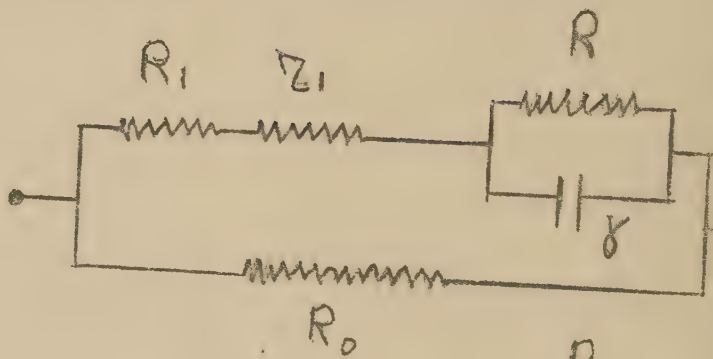
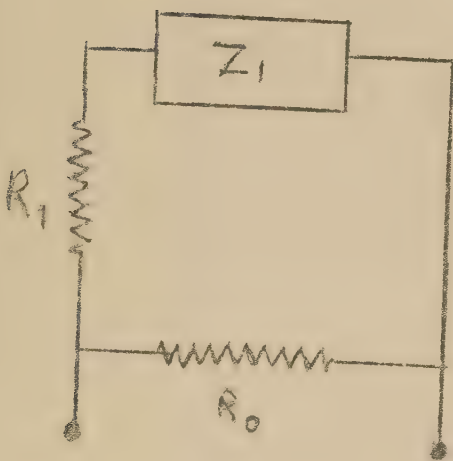
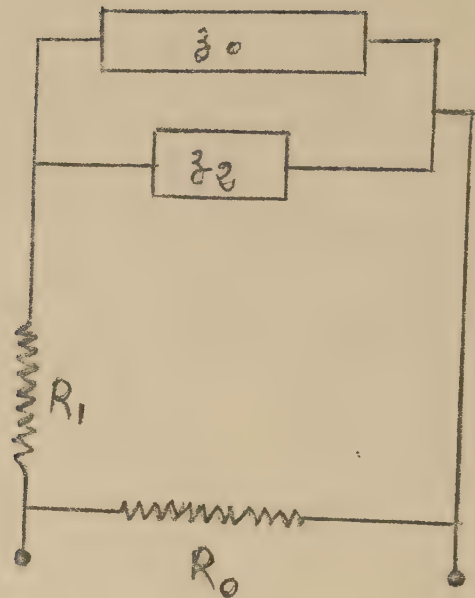
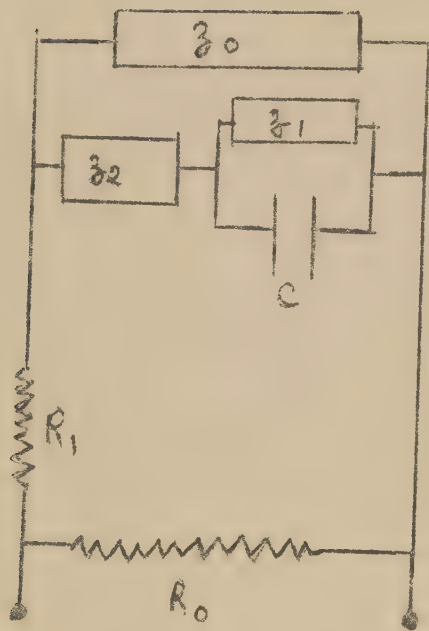
r_1 sera la résistance cytoplasmique susceptible de varier mécaniquement avec la déformation du muscle.
 R étant la résistance de membrane
 χ la capacité de polarisation.

Nous avons résumé le passage entre ces différents schémas page 79. On appellera r la somme de $R_1 + r_1$.

On peut même rajouter à notre schéma simplifié une résistance série supplémentaire R'_c , purement ohmique, qui tiendrait compte des plans cutanés érodés, la suite des calculs montrant que cette addition n'apporte rien de nouveau aux hypothèses.

Ce modèle concorde avec le lieu expérimental.

Il est facile en effet de vérifier que le lieu d'impédance en fonction de la fréquence est un cercle non centré sur l'origine (χ est une capacité de polarisation), donc identique au lieu expérimental.



Calcul de $\frac{dZ}{Z}$ dans ce modèle.

Calculons maintenant la variation relative d'impédance de ce modèle provoquée par la variation de r_1 (résistance cytoplasmique des cordes vocales variant mécaniquement).

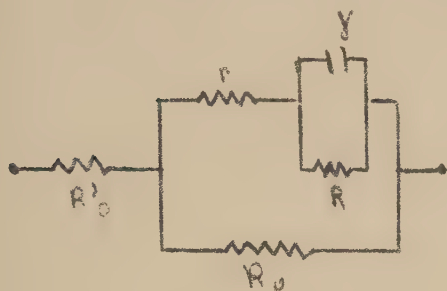


Fig. 53

On conviendra d'appeler :

$$Z = R'_0 + Z \quad (I)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R'_0} + \frac{1}{Z_1} \quad (II)$$

Z seul est l'ensemble sans la résistance série.

$$Z_1 = r + Y // R$$

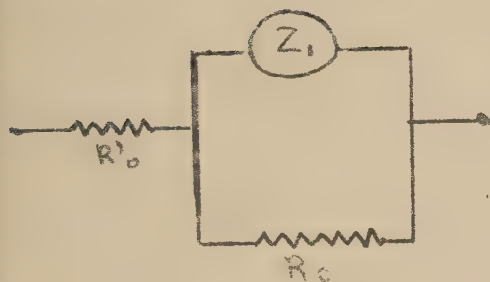


Fig. 54

Dans Z , seul varie Z , donc $dZ = dZ$

Dans Z_1 ; seul varie r en série, donc $dZ_1 = dr$

Dans Z , seul varie Z_1

Donc : $\frac{dZ}{Z^2} = \frac{dZ_1}{Z_1^2}$ $dZ = \frac{Z^2}{Z_1^2} \cdot dZ_1$

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{Z^2}{Z_1^2} \cdot \frac{dZ_1}{Z}$$

$$\frac{dZ}{Z} = \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^2 \frac{dZ_1}{Z} \quad (III)$$

D'après (II) on peut remplacer $\frac{Z}{Z_1}$ par $\frac{R_0 - Z}{R_0}$

d'après (I), $Z = Z' - R'_0$

Ce qui donne en portant dans (III)

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{(R_0 + R'_0 - Z)^2}{Z} \cdot \frac{dZ}{R_0^2}$$

$\frac{dZ}{R_0^2}$ facteur purement réel a un argument nul.
D'où la relation :

$$\text{argument } \frac{dZ}{Z} = 2 \arg (R_0 + R'_0 - Z) - \arg Z$$

$$\text{Arg } \frac{dZ}{Z} = 2 \arg (R_0 + R'_0 - Z) + |\arg Z|$$

On peut écrire : plus valeur absolue de l'argument de Z parce que argument de Z est négatif.

On voit que cette relation va permettre de comparer la valeur expérimentale de $\frac{dZ}{Z}$ donnée par les photos,

avec un argument théorique (second membre de l'équation ci-dessus), où n'interviendra qu'un seul paramètre à ajuster : la valeur de $R_0 + R'_0$, puisque Z est précisément connu par le lieu d'impédance au repos.

Comment calculer l'argument de $R_0 + R'_0 - Z$?

1- connaissant le lieu de Z , on en déduit celui de $-Z$ par une symétrie par rapport à l'origine.

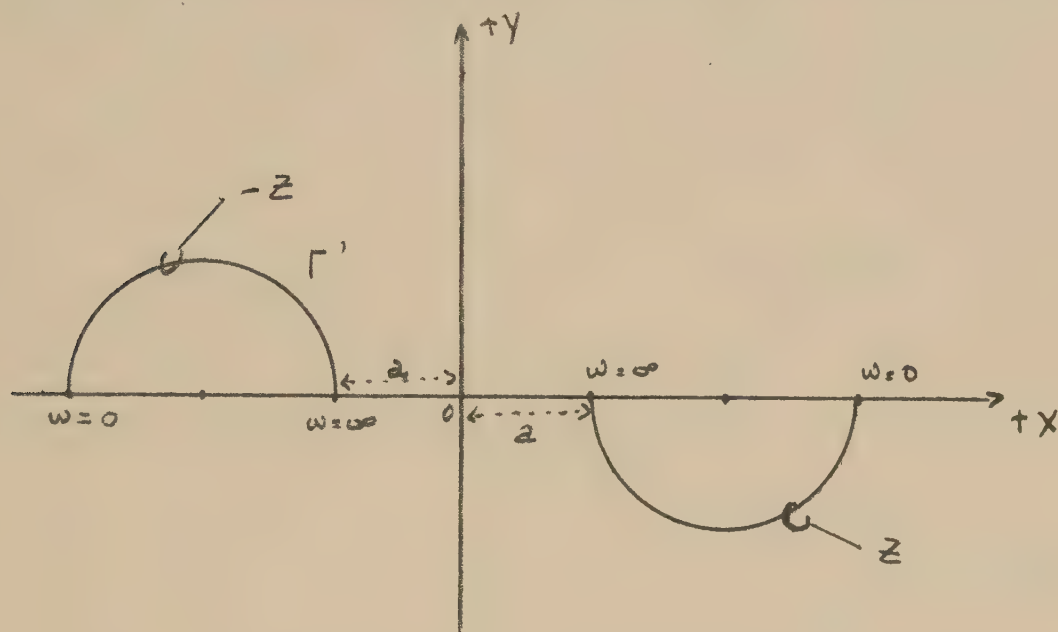


Fig. 55

2- Le lieu de $R_0 + R'_0 - Z$ sera déduit de la figure précédente par une translation du cercle Γ' de la quantité positive et réelle $R_0 + R'_0$ ceci nous amène à Γ'' , lieu de $(R_0 + R'_0 - Z)$ dont l'argument à une fréquence déterminée nous $\bar{y}$ est donnée par l'angle ψ

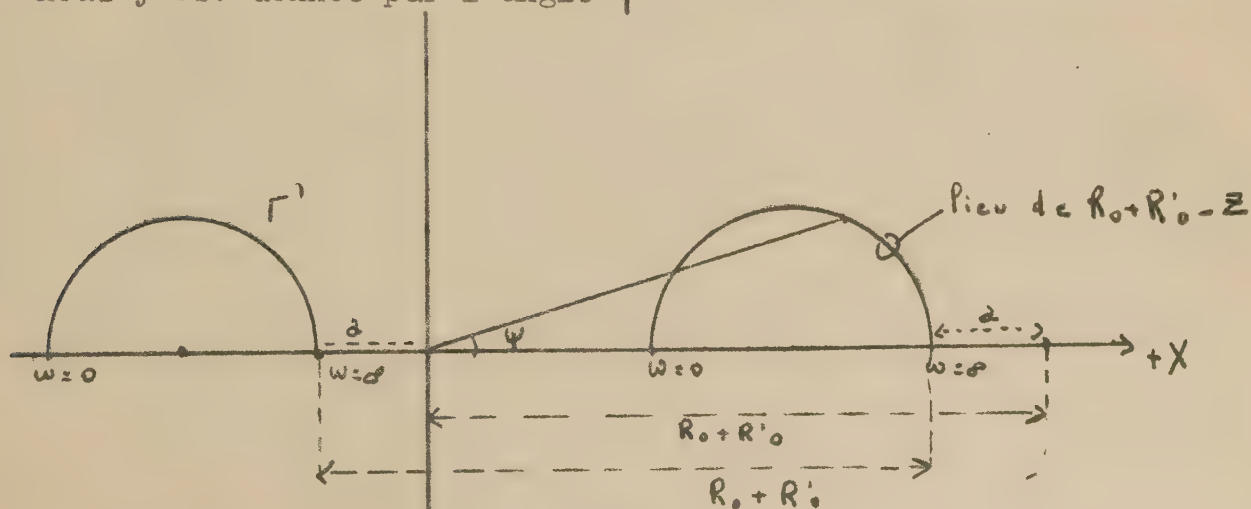


Fig. 56.

On passe de la figure 56, à la figure 57, plus commode à tracer à partir du lieu expérimental, par une translation de l'origine et un retournement.

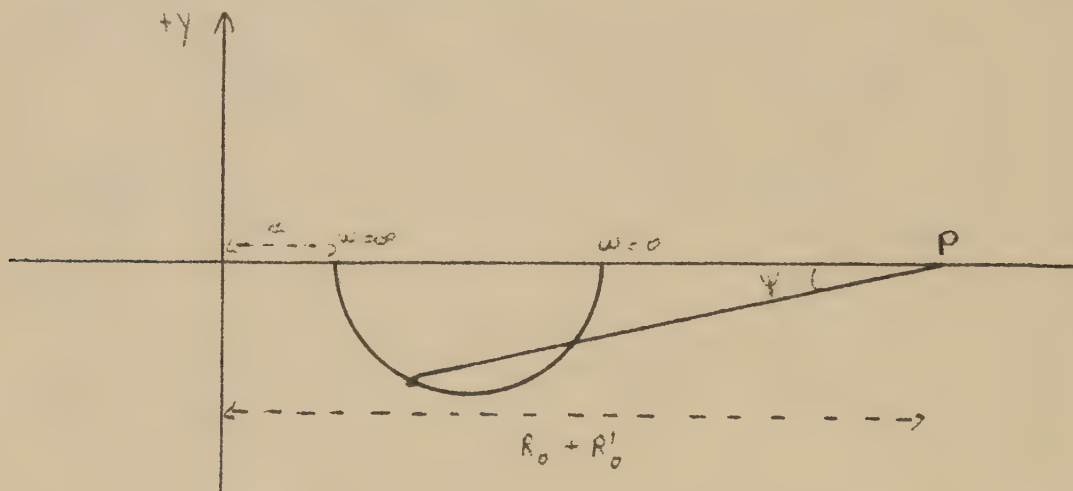


Fig. 57.

Pour obtenir cet argument ψ à partir du lieu expérimental il suffit d'ajuster un point P sur l'axe réel, de sorte que pour (fig 57) une fréquence donnée, la relation théorique soit vérifiée.

Ceci étant, si la théorie est exacte, il doit y avoir concordance entre les $\frac{dz}{z}$ expérimentaux et les $\frac{dz}{z}$ théoriques pour les 3 autres fréquences.

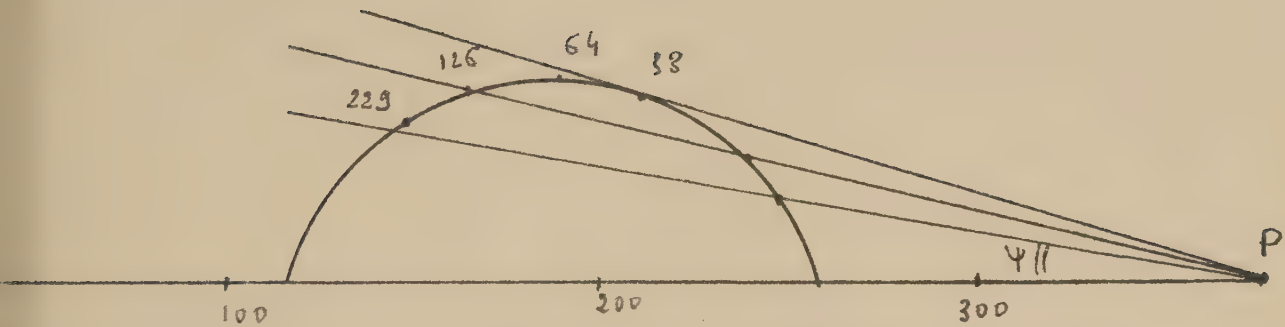
La distance OP nous donnera la valeur de $R_0 + R'_0$.

Ces constructions ont été faites pour les 8 expériences complètes que nous avons présentées. Les tableaux ci-contre résument les calculs. On voit que dans l'ensemble, la concordance est bonne dans la limite des erreurs expérimentales. Le schéma équivalent au larynx que nous avons retenu nous paraît donc le plus vraisemblable.

En voix de noitrine du moins, la variation d'impédance laryngée serait due essentiellement à une variation mécanique de la résistance série de l'impédance des cordes vocales.

12 - 4 - 61

Distance OP = 376 Ohms



Exemple d'estimation du point P à partir du
lieu expérimental du 12-4-61.

L'angle Ψ est l'argument de $R_0 - Z$ à 229 KHz

N kHz	$-\arg Z$ corrigé	(Z) ohms	$\arg \exp$ de $\frac{dZ}{Z}$	$\arg.$ ($R_0 - Z$)	$2 \arg.$ ($R_0 - Z$)	$\arg \text{thio}$ de $\frac{dZ}{Z}$	
248	9	142	$27\frac{1}{2}$	9	18	27°	exact
128	$12\frac{1}{2}$	157	39	$13\frac{3}{4}$	$27\frac{1}{2}$	40°	pratiquement exact
64	$13\frac{1}{4}$	179	52	19	38	$51\frac{1}{4}$	pratiquement exact
33	12	194	55	22	44	56	pratiquement exact

Le point P a été ajusté à 290 ohms

Exp. 1

N kHz	$-\arg Z$ corrigé	(Z) ohms	$\arg \exp$ de $\frac{dZ}{Z}$	$\arg.$ ($R_0 - Z$)	$2 \arg.$ ($R_0 - Z$)	$\arg \text{thio}$ de $\frac{dZ}{Z}$	Concordance
248	$8\frac{1}{2}$	143	19	$5\frac{1}{2}$	11	$19\frac{1}{2}$	exact
128	$12\frac{1}{4}$	158	$40\frac{1}{2}$	$14\frac{1}{2}$	29	$41\frac{3}{4}$	assez bon
64	$15\frac{1}{4}$	183	$45\frac{1}{2}$	15	30	$45\frac{1}{2}$	exact
33	$15\frac{1}{4}$	200	45	17	34	$49\frac{1}{4}$	divergence +4°

Point P : 360 ohms

Exp. 2

N KHz	$-\arg Z$	$ Z $ ohms	$\arg$ exp de $\frac{dZ}{Z}$	$-\arg Z$ corrigé	$\arg.$ ($R_0 - Z$)	$\angle \arg.$ ($R_0 - Z$)	$\arg.$ théorique de $\frac{dZ}{Z}$	Concordance
229	$11\frac{1}{2}$	198	36	$10\frac{1}{2}$	$13\frac{1}{4}$	$26\frac{1}{2}$	37	pratiquement exact
126	12	155	$41\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{2}$	19	38	<u>49</u> $\frac{1}{2}$	écart + 8°
64	10	172	52	$10\frac{1}{2}$	$22\frac{1}{2}$	45	$55\frac{1}{2}$	écart + 3° $\frac{1}{2}$
33	8	183	56	$8\frac{1}{2}$	$23\frac{1}{2}$	47	$55\frac{1}{2}$	exact

Point P : 235 ohms

Exp! 3

N KHz	$-\arg Z$	$ Z $ ohms	$\arg \frac{dZ}{Z}$ exp.	$-\arg$ corrigé Z	$\arg.$ ($R_0 - Z$)	$\arg.$ théorique de $\frac{dZ}{Z}$	Concordance
229	10	156	28	9	$9\frac{1}{2}$	28	exact
126	11	170	38	$10\frac{1}{2}$	$13\frac{1}{4}$	37	pratiquement exact
64	10	188	$44\frac{1}{2}$	$10\frac{1}{2}$	17	$44\frac{1}{2}$	exact
33	$8\frac{1}{2}$	196	45	$9\frac{1}{4}$	18	$45\frac{1}{4}$	exact

Point P : 295 ohms

Exp! 4

N kHz	$-\arg(Z)$ moyen	$ Z $ moyen ohms	$\arg \exp$ $\frac{dZ}{Z}$	$\arg$ $(R_0 - Z)$	$2 \arg$ $(R_0 - Z)$	$\arg \text{theo}$ $\frac{dZ}{Z}$	Concordance
223	$15 \frac{1}{2}$	154	31	$7 \frac{1}{2}$	15	$30 \frac{1}{2}$	exact
126	$20 \frac{1}{2}$	173	45	$11 \frac{1}{2}$	23	$43 \frac{1}{2}$	écart $-1^\circ \frac{1}{2}$
64	$21 \frac{1}{2}$	205	$51 \frac{1}{2}$	15	30	$51 \frac{1}{2}$	exact
33	$20 \frac{1}{2}$	241	54	$18 \frac{1}{2}$	$37 \frac{1}{2}$	58	écart $+4^\circ$

Point P : 470 ohms

Exp. 5

N kHz	$-\arg Z$ moyen	$ Z $ moyen en ohms	$\arg \exp$ $\frac{dZ}{Z}$	$\arg Z$ $(R_0 - Z)$	$2 \arg$ $(R_0 - Z)$	$\arg \text{theo}$ $\frac{dZ}{Z}$	Concordance
223	16	140	38	$8 \frac{1}{4}$	$16 \frac{1}{2}$	$32 \frac{1}{2}$	écart $-5^\circ \frac{1}{2}$
126	18	160	39	$10 \frac{1}{2}$	21	39	exact
64	21	186	52	$15 \frac{1}{2}$	31	52	exact
33	20	220	53	$18 \frac{1}{2}$	37	57	écart $+4^\circ$

Point P 420 ohms

Exp. 6

N_{KH_2}	$-\arg. Z$	$ Z $	arg. exp. de $\frac{dZ}{Z}$	arg. de $(R_0 - Z)$	2 arg. de $(R_0 - Z)$	arg. théorique de $\frac{dZ}{Z}$	
229	$15 \frac{1}{2}$	156	31	$9 \frac{3}{4}$	$19 \frac{1}{2}$	35	écart. +4
126	$17 \frac{1}{4}$	174	$43 \frac{1}{2}$	13	26	$43 \frac{1}{4}$	écart
64	$15 \frac{3}{4}$	196	48	16	32	$47 \frac{3}{4}$	écart
33	$13 \frac{1}{2}$	216	$46.49 \frac{1}{2}$	$16 \frac{3}{4}$	$33 \frac{1}{2}$	47	+1 - $2 \frac{1}{2}$

Point P : 376 ohms

Exp. 7

N	arg. Z corrigé	arg. exp. de $\frac{dZ}{Z}$	arg. de $(R_0 - Z)$	2 arg. de $(R_0 - Z)$	arg. théo. de $\frac{dZ}{Z}$	$ Z $	Ecart	Concordance
229	15	43	$12 \frac{1}{4}$	$24 \frac{1}{2}$	$39 \frac{1}{2}$	178	$-3 \frac{1}{2}$	Médiocre
126	$16 \frac{1}{2}$	$48 \frac{1}{4}$	16	32	$48 \frac{1}{2}$	200	$+\frac{1}{4}$	Bonne
64	$16 \frac{1}{4}$	$56 \frac{1}{2}$	21	42	$58 \frac{1}{4}$	232	$+1 \frac{1}{3}$	Bonne
33	$13 \frac{3}{4}$	$63 \frac{1}{2}$	$23 \frac{1}{4}$	$46 \frac{1}{2}$	$61 \frac{1}{4}$	252	$-2 \frac{1}{4}$	Médiocre

Point P. / 390 ohms

Exp. 8

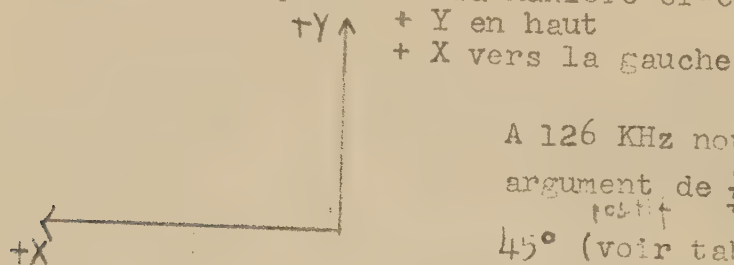
Sens de la variation d'impédance lors de l'ouverture glottique.

Avant de pouvoir donner une interprétation du glottogramme, un problème majeur se pose : quel est le sens de variation du module de l'impédance lors de l'ouverture de la glotte?

Il est important de remarquer d'abord que, si par exemple r diminue dans le modèle précédent, l'impédance globale diminuera aussi parce que r est en série avec l'élément comprenant une capacité. (*)

En se reportant au schéma anatomique (fig.), il est en fait difficile de prévoir si, lors de l'ouverture glottique, la résistance série de l'impédance des cordes diminue ou augmente. Tous les raisonnements portant sur les modifications de la section perpendiculaire aux lignes de courant sont, en effet, sujets à caution. Le mieux est donc de se rendre compte expérimentalement du sens de la variation de l'impédance laryngée.

Avec notre dispositif expérimental à cercle pointé, les axes du cadran représentant le plan complexe, sont conventionnellement disposés de la manière ci-contre



A 126 KHz nous obtenons un argument de $\frac{dZ}{Z}$ de l'ordre de 45° (voir tableaux).

Or nous l'avons vu :

$$\frac{dZ}{Z} = \frac{(R_0 + \frac{R'_0}{Z} - Z)^2}{Z} \cdot \frac{dr}{R_0^2}$$

donc , en posant $Z_m = \frac{1}{R_0^2} \cdot \frac{(R_0 + R'_0 - Z)^2}{Z}$

NOTE: (*) Il n'en serait pas nécessairement de même si cette variation portait sur R ; on peut en effet montrer que dans un schéma de Philipsson une diminution de la résistance de membrane peut au moins à certaines fréquences, entraîner si paradoxal que cela puisse paraître, une augmentation du module.

$$\arg Z_m = 45^\circ$$

On peut écrire $\frac{dz}{z} = Z_m \cdot dr$.

Comme le montre la figure 58, à dr positif, correspond une augmentation de $\left| \frac{dz}{z} \right|$, à condition que le point initial (représentant l'impédance laryngée au repos), soit dans le premier quadrant.

Substituons maintenant, par commutation, à la tension appliquée sur OY, un balayage tel que l'axe des temps soit dirigé vers le bas.

On aura les variations relatives du module $\left| \frac{dz}{z} \right|$ en fonction du temps, par l'enveloppe de la courbe de la porteuse.

On reconnaîtra l'ouverture glottique au fait qu'elle est plus rapide que la fermeture (figure 4)

Donc, avec nos conventions : A gauche du quadrant, si r augmente pendant l'ouverture, le module de $\frac{dz}{z}$ doit augmenter aussi. On aura la courbe n°1 bien reconnue au fait que le plateau est en dedans.

Si r diminue pendant l'ouverture glottique, c'est à dire pendant la contraction des cordes, le module de $\frac{dz}{z}$ doit diminuer, on aura donc la courbe n°2, avec plateau en dehors.

Cette expérience a été faite (sujet L.G. 126 KHz, voix de poitrine). L'équilibre est fait en position phonatoire. On s'assure que la variation observée en cercle pointé se fait et se maintient bien dans le 1er quadrant (sup. gauche); une clé, substituée à la tension appliquée en PY un balayage en dents de scie, synchronisé par un microphone. On constate à plusieurs reprises (photos) un plateau toujours en dehors, ce qui permet de conclure que l'impédance laryngée diminue pendant l'ouverture de la glotte; cette diminution d'impédance étant due dans notre schéma à une diminution (dr négatif) de la résistance série de l'impédance des cordes vocales.

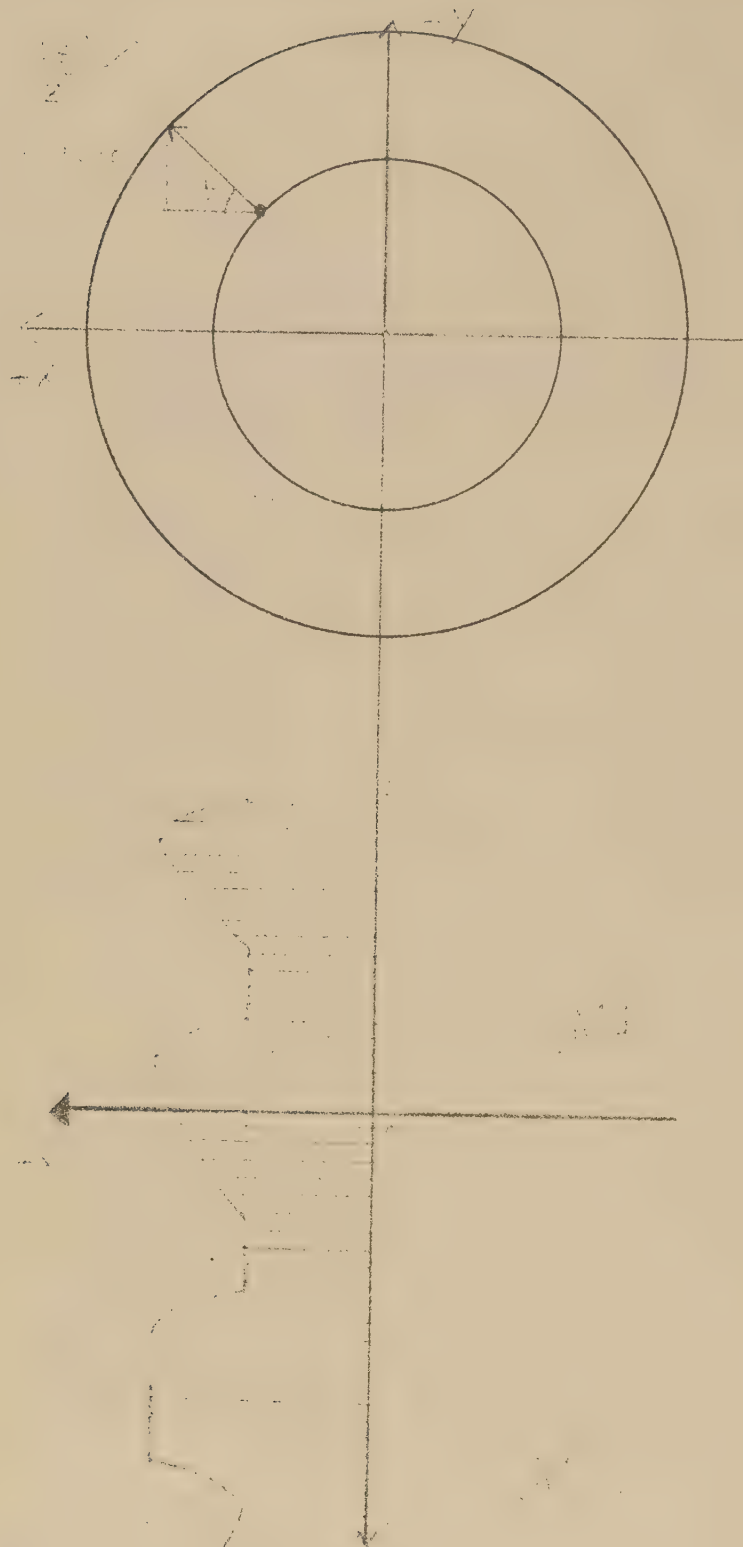


Fig. 58.

Cette expérience est très importante : elle confirme que la capacité glottique ne joue qu'un rôle secondaire, puisqu'au cours de l'ouverture glottique, la capacitance augmentant, devrait par conséquent augmenter l'impédance laryngée, or c'est le contraire qui se produit.

On remarquera également que, si le glottogramme avait été dû essentiellement à une variation de capacité, il aurait fallu, pour qu'il fût une image fidèle du mouvement des cordes, que cette capacité ne fût pas shuntée, ainsi la capacitance aurait été une fonction linéaire de l'élongation des cordes. Or, il est manifeste, que, quel que soit le schéma envisagé, cette capacité est shuntée par une résistance pure dans les cas les plus simples, par des impédances dans les schémas plus élaborés.

On voit, en se reportant à la figure 77, que l'existence de ce shunt supprime toute proportionnalité entre la variation de module et l'élongation des cordes. La variation d'impédance laryngée serait extrêmement rapide dès les tous premiers moments de l'ouverture, pour se maintenir en plateau ensuite, si bien que le glottogramme en fonction du temps aurait presque l'allure d'un signal rectangulaire.

La variation mécanique de la résistance-série de l'impédance musculaire des cordes est donc la variation du paramètre le mieux en rapport avec la position des cordes sans qu'on puisse, bien sur toutefois affirmer que ces deux grandeurs varient de façon linéaire. L'hypothèse admise semble ainsi pouvoir expliquer pourquoi l'allure du glottogramme est tout à fait semblable au décours du mouvement des cordes, connu par stroboscopie.

Quelle peut être cependant l'influence de la variation de capacitance maintenant que nous sommes en droit de penser :

- qu'elle est de signe contraire à la variation de résistance dr
- qu'elle est beaucoup plus faible.

Nous avons pour ce faire, composé vectoriellement les deux variations dr et $dZ_2(c)$ fig. 49 en supposant que la variation de résistance était proportionnelle à l'élongation des cordes et que la capacité glottique variait en raison inverse de cette élongation.

Donc quand l'élongation x croît de la valeur 0 (glotte fermée) à une valeur maxima x_0 (glotte ouverte):

- r décroît $dr < 0$
- l'admittance $C \omega$ décroît puisque $C = \frac{k}{x}$
- la variation d'impédance due à la variation de ω capait

$\Delta Z_{2(c)}$ nous sera donnée par la construction de la page 77. La même figure a été reproduite ci contre en portant sur la verticale élevée en B des longueurs proportionnelles à $\frac{1}{x}$.

Pour évaluer la forme du lieu composé, seul importera le rapport de la variation dr à la variation $\Delta Z_{2(c)}$.

Ce rapport est inconnu. Nous en avons choisi 2 valeurs arbitraires pour construire ce lieu.

La variation dr est choisie comme origine des phases et portée avec son sens correct :

$$dr < 0 \text{ quand } \Delta x > 0$$

et avec une longueur que nous avons choisie constante. Nous l'avons composé avec des valeurs homothétiques de $\Delta Z_{2(c)}$.

La figure montre 2 trajets théoriques.

Si $\Delta Z_{2(c)}$ est choisi moitié de sa valeur maxima possible, le trajet présente un crochet avec un point de rebroussement.

Si $\Delta Z_{2(c)}$ est choisi égal au maximum, il apparaît une petite boucle à une extrémité.

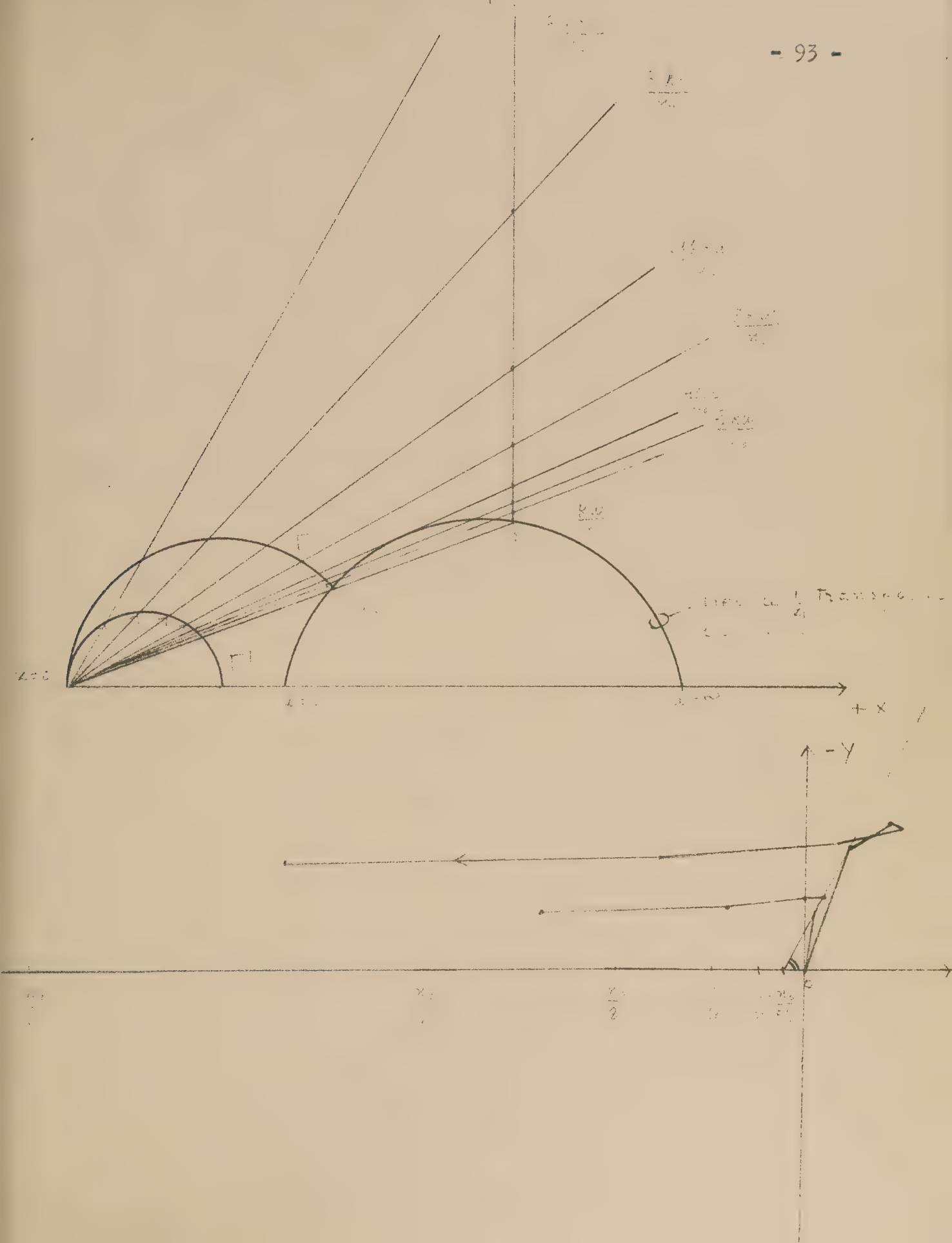
Dans les deux cas, le reste du trajet est rectiligne suivant la phase de dr .

Il serait donc tentant d'expliquer ainsi les épaississements et parfois les petites boucles observées en voix de poitrine aux extrémités du trajet de $\frac{dZ}{Z}$.

Cela confirme en tous cas que la capacité glottique ne joue qu'au tout début de l'ouverture de la glotte.

Un trajet analogue avec deux directions ainsi coudées l'une sur l'autre a pu être retrouvé au cours de l'expérience suivante :

Deux électrodes en argent de même surface que celle utilisée en glottographie, 0,8 cm², sont maintenues sur la face interne des joues par deux pinces dont on peut régler le serrage.



Un parafinage de toutes les surfaces conductrices non utiles et un isolement correct des connections est nécessaire afin d'éviter le court-circuit par la salive.

Lors des mouvements d'ouverture de la bouche, il semble bien que l'on puisse distinguer au trajet observé deux portions :

- l'une survenant la première, inconstante, n'est observée que lors des mouvements des lèvres d'assez grande amplitude. Il semble bien lié au fait que les lèvres soient écartées ou au contact.

- l'autre portion, constamment observée, coudée sur la première avec un angle presque droit, est observée lorsque le sujet contracte plus ou moins l'orbiculaire des lèvres.

En voix de poitrine, la portion la plus longue correspondrait à la variation de la résistance des cordes vocales.

L'extrémité incurvée pourrait plutôt correspondre aux variations de la capacité glottique.

Variation électrophysiologique

Nous n'avons envisagé jusqu'ici que des variations mécaniques qu'il s'agisse de variation de capacité ou de variation de résistance.

Mais on pourrait discuter la possibilité d'une variation de résistance électrophysiologique portant sur le paramètre R du schéma simplifié. Si on admet la théorie de Husson, le caractère synchrone de la contraction du thyro-aryténoïdien interne rend alors possible la sommation de ces différentes variations de la résistance de membrane.

On a vu page 80 que dans le schéma simplifié :

$$Z_1 = r + Y // R$$

Si R varie de dR , calculons la variation relative $(\frac{dZ}{Z})_R$

posons : $Z_m = Y // R$

$$\Delta Z_1 = \Delta Z_m, \quad \frac{\Delta Z_m}{Z_m^2} = \frac{\Delta R}{R^2}, \quad \Delta Z_m = Z_m^2 \frac{\Delta R}{R^2}$$

soit en posant $\frac{\Delta R}{R^2} = dK$, dK étant un paramètre différentiel réel.

$$dZ_1 = Z_m^2 \cdot dK$$

Il suffit dans (III) page 81 de remplacer dr par dZ_1 pour obtenir :

$$\left(\frac{dZ}{Z} \right)_R = \frac{Z^2}{Z_1} \cdot \frac{Z_m^2}{Z} \cdot dK$$

$$\text{D'où :} \quad \left(\frac{dZ}{Z} \right)_R = \left(\frac{dZ}{Z} \right)_r \cdot Z_m^2 \frac{dK}{dr}$$

relation qui va nous permettre de comparer les arguments de $\frac{dZ}{Z}$ indice R , et de $\frac{dZ}{Z}$ indice r , à condition de connaître l'argument de Z_m .

Or on peut connaître ce dernier à partir du lieu expérimental en estimant la valeur de $R_0 + R'_0$.

Il suffit de parcourir les étapes inverses de la construction du modèle simplifié. C'est ce que nous avons fait pages suivantes à partir du lieu expérimental du 18 Février, 1ère expérience (choisi en raison de sa bonne concordance) R'_0 sera estimé nul. R_0 nous est donné par la distance du point P: 235 ohms.

On a porté dans le tableau ci/contre :

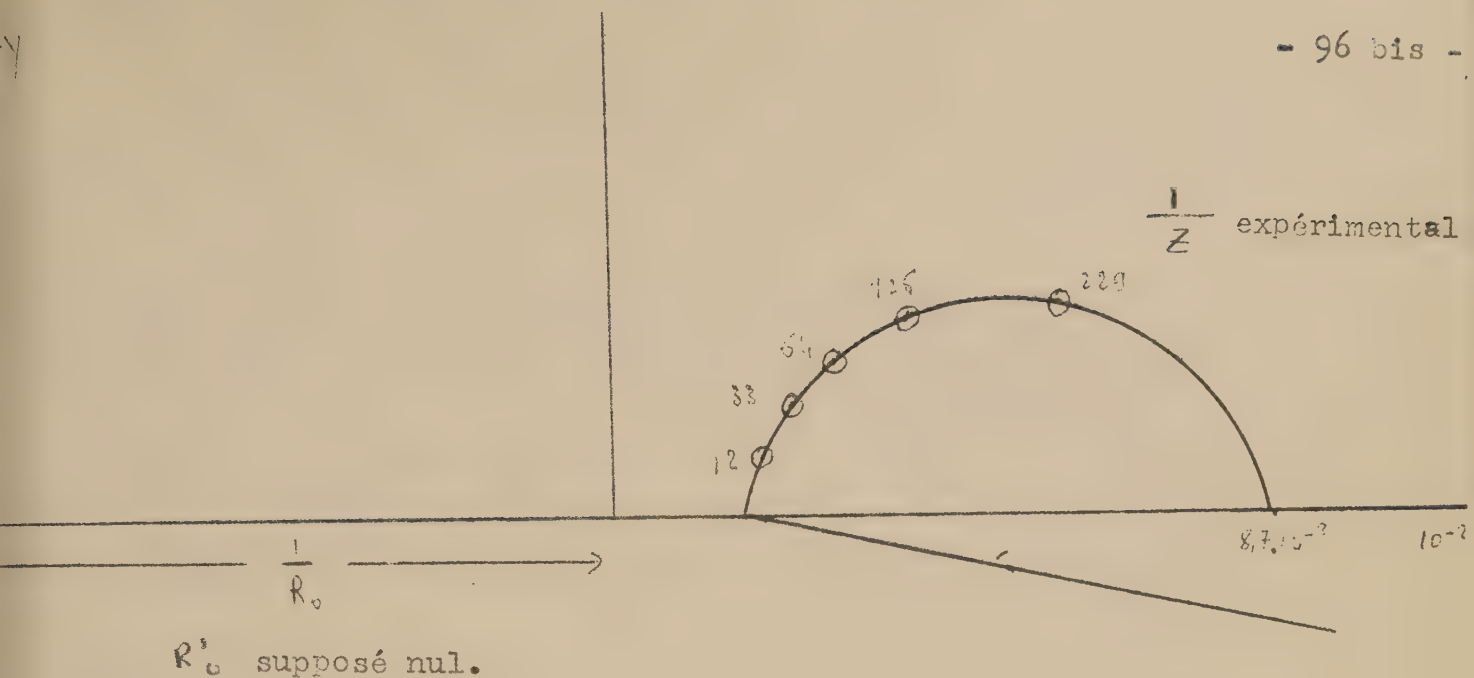
$$\arg \left(\frac{dz}{z} \right)_R = \arg \left(\frac{dz}{z} \right)_r + 2 \arg. Z_m.$$

N	Arg Z_m	2 Arg Z_m	arg.théor. de $\frac{dz}{z}(R)$
229	- 69°	-138	- 161°
126	- 63°	- 126	- 76°
64	-53°	- 106	- 50°
33	- 44°	- 88	- 32°

On voit que les deux variations relatives $\left(\frac{dz}{z} \right)_r$ et $\left(\frac{dz}{z} \right)_R$

forment respectivement à chaque fréquence un angle compris entre 88° et 138°.

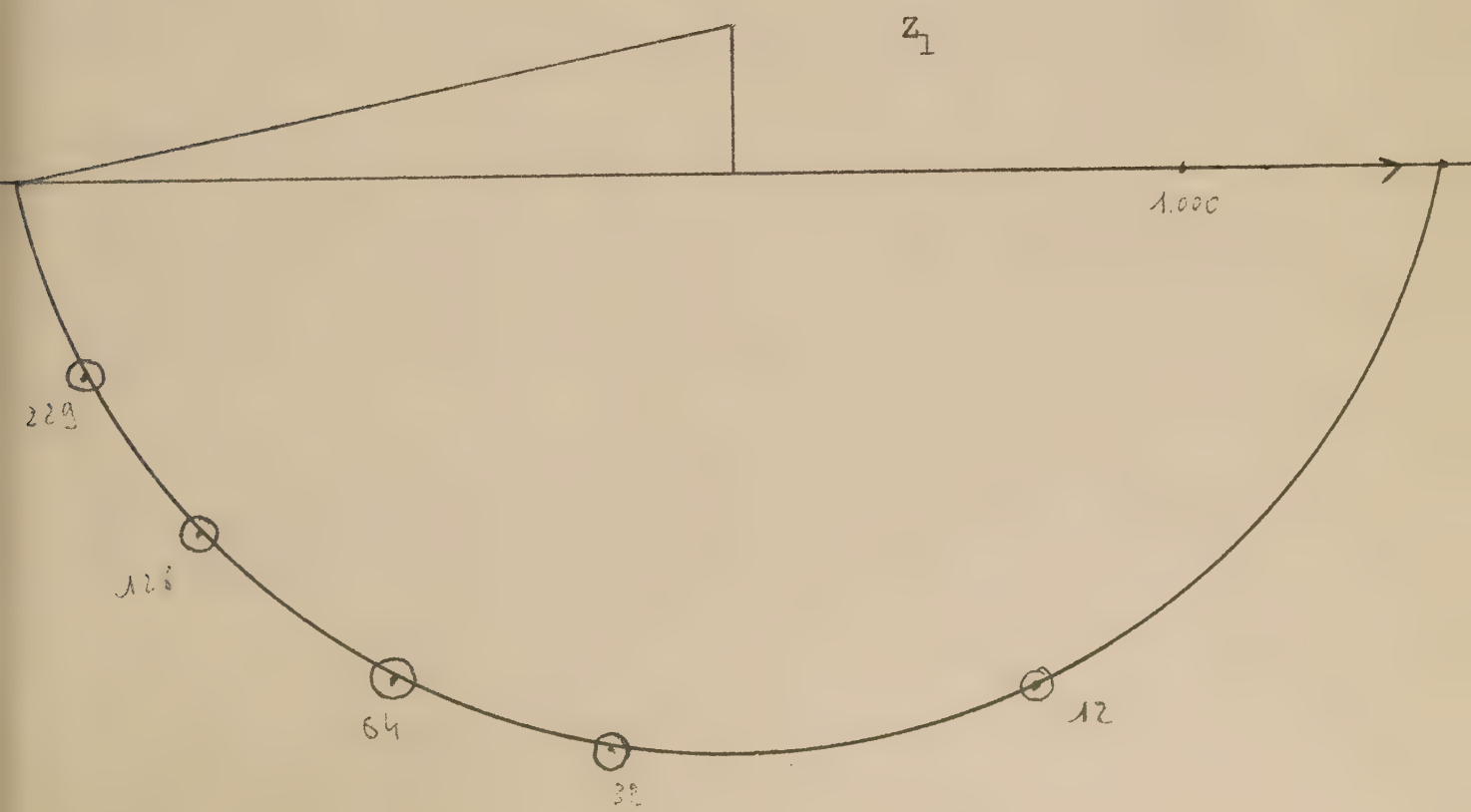
Or si cette variation d'impédance électrophysiologique existe, (ce qui serait en faveur de la théorie neuro-chronaxique), elle n'est pas synchrone de la variation mécanique portant sur la résistance série r' .



$$R_0 = 235 \text{ ohms}$$

$$r = 225 \text{ ohms}$$

$$R = 950 \text{ ohms}$$



La première, au délai synaptique près, suit l'influx récurrentiel, est rapide, de la durée d'un potentiel d'action, alors que la seconde, synchrone de la contraction musculaire, est en retard sur la première.

Si donc, nous composons vectoriellement ces deux variations en admettant qu'elles ont la même forme, que leur module soit du même ordre de grandeur et que leurs directions sont grossièrement perpendiculaires, on obtiendra dans le plan complexe un trajet dont la forme va dépendre du décalage temporel existant entre les deux.

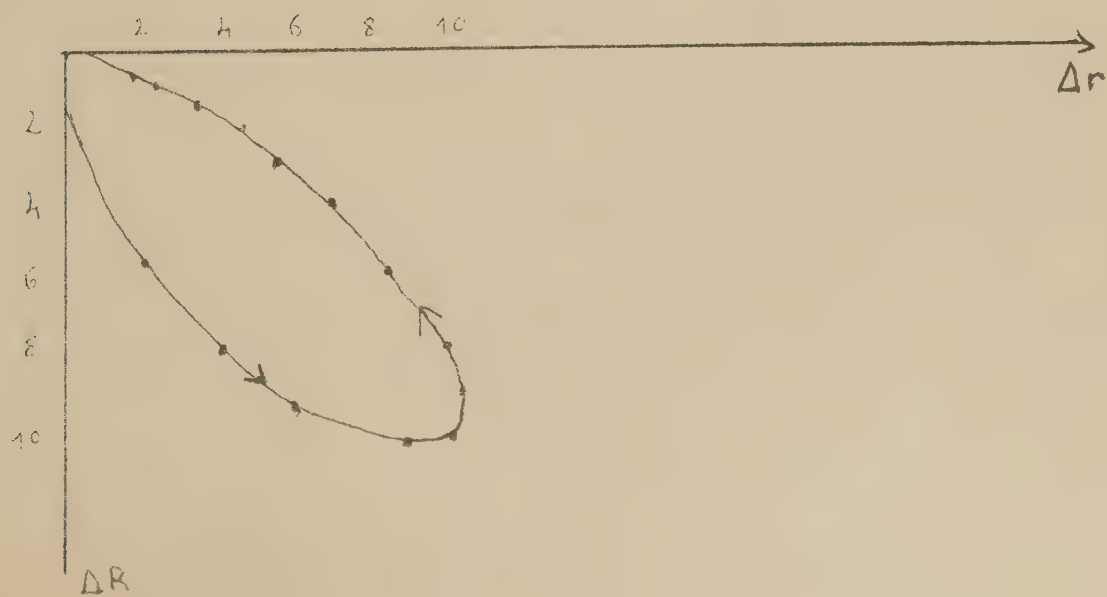
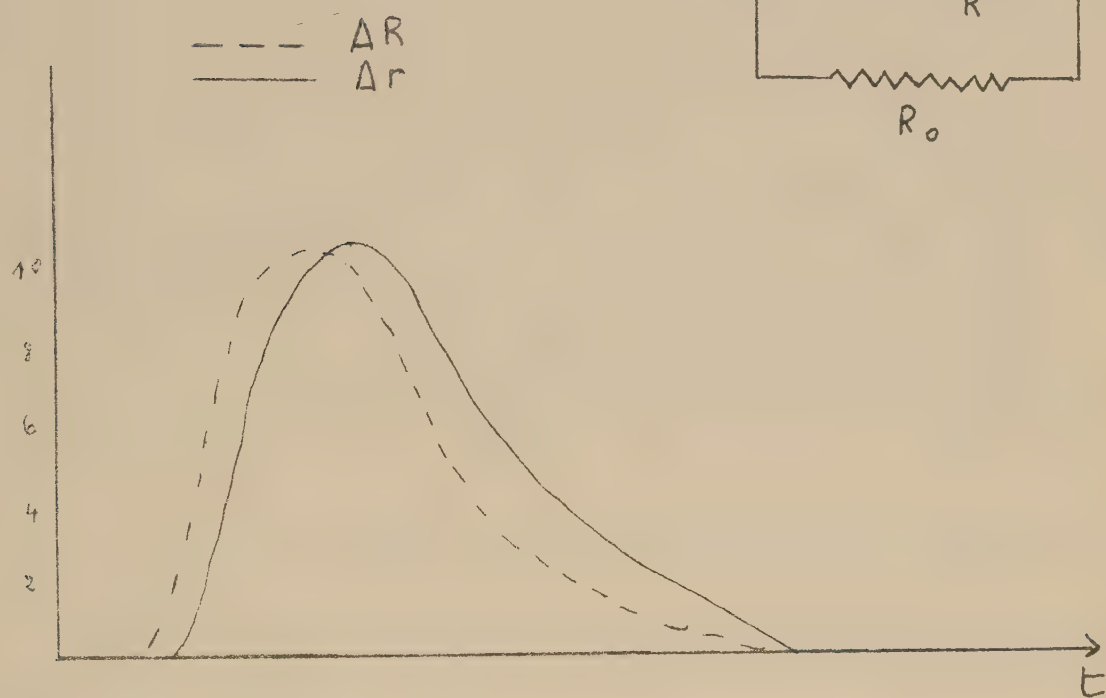
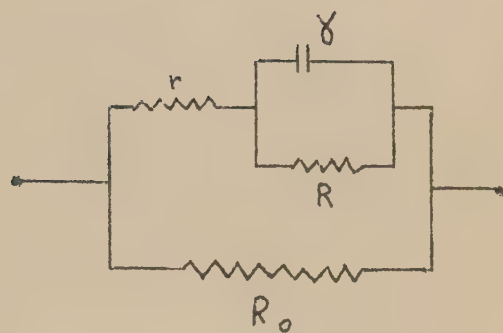
En jouant sur ce décalage (c'est à dire sur leur asynchronisme), sur l'amplitude de leur module respectif, on voit qu'il est possible d'obtenir une courbe fermée plus ou moins ventrue. Une telle courbe fermée présente un trajet à l'aller différent de celui du retour.

En voix de poitrine, cette boucle fermée n'est pas observée, il est donc très probable que les variations d'impédance physiologique qui doivent exister en théorie de Husson sont très petites par rapport aux variations mécaniques de résistance série.

Il pourrait en être tout autrement en voix de fausset où nous avons observé des boucles. L'amplitude des vibrations mécaniques des cordes est beaucoup plus faible en voix de fausset qu'en voix de poitrine et les deux types de variations pourraient avoir le même ordre de grandeur expliquant les boucles prévues par la figure.

Du reste, le seul moyen d'expliquer une courbe fermée est de faire varier au moins deux paramètres de façon non synchrones (thèse de Chanteur page). Mais le problème est plus compliqué ici encore que dans le reflexe psycho-galvanique, car étant donnée la rapidité de la variation (alors que la boucle du RPG était lente), il est pratiquement impossible de savoir si ce qu'on observe sur l'écran est une courbe fermée ou une simple boucle dessinée par un trajet dont l'aller est identique au retour.

On aurait même pu expliquer la boucle de fausset par un asynchronisme "externe". Il faudrait imaginer que la seule variable serait la résistance série, l'asynchronisme n'apparaissant qu'en régime biphasé : les fibres se partageant alors en deux groupes, un groupe se contractant après l'autre.



Mais dans ces conditions, pour qu'il y eût une boucle fermée, il aurait fallu que les variations d'impédances dues à chaque groupe ne fussent pas en phase (sinon le trajet eût été de nouveau rectiligne). Il aurait fallu donc admettre une hétérogénéité de structure inadmissible dans les fibres du thyro-aryténoïdien interne, pour que l'explication de la boucle en voix de fausset par le polyphasage soit possible.

Le rôle exact joué par la variation d'impédance physiologique est donc difficile à débattre. Il faudrait connaître d'abord sur muscle isolé quelle est son importance par rapport à la variation d'ordre mécanique.

Les expériences que nous avons commencées à ce sujet, sur muscle de grenouille, nous ont montré des boucles, mais inconstantes. Il est nécessaire de les reprendre. Ce n'est donc qu'avec les plus grandes réserves que nous avançons cette interprétation concernant la voix de fausset qui doit être l'objet d'un travail ultérieur.

CONCLUSIONS

Ce travail a pour but de mesurer les variations d'impédance laryngée au cours de la phonation, de manière à en tirer des informations concernant le schéma électrique équivalent du larynx.

Ces mesures ont été établies par la méthode du cercle pointé, utilisant 4 fréquences 33, 64, 126, 229 KHz. La fréquence de la porteuse devant être supérieure à la fréquence acoustique de modulation d'impédance. Cette technique permet de suivre directement sur l'écran d'un oscilloscope le module et la phase de la variation relative d'impédance $\frac{\Delta Z}{Z}$.

Huit expériences complètes ont été faites chez deux sujets différents. Elles comprennent le lieu d'impédance du larynx au repos, et les trajets photographiés de $\frac{\Delta Z}{Z}$.

La forme de ce trajet ne dépend que du registre : presque rectiligne en voix de poitrine, il forme une boucle en voix de fausset.

Le schéma proposé est nécessairement très simplifié. Il tient compte néanmoins des exigences anatomiques, physiologiques et électriques.

A l'intérieur de ce schéma 3 variables ont été discutées la capacité glottique, la résistance série de l'impédance des cordes, la résistance de membrane de l'impédance des cordes.

La variation mécanique de la capacité glottique est minimisée par son shunt. Ce shunt est anatomiquement inévitable et seul il peut expliquer la faible profondeur de modulation du glottogramme alors que la capacitance glottique varie énormément. Si bien que cette variable que l'on considèrerait jusqu'ici comme prédominante ne joue en réalité qu'un rôle de second plan, du moins en voix de poitrine.

La variation mécanique de la résistance série de l'impédance des cordes, prédomine largement en voix de poitrine;

le calcul peut établir une relation entre les arguments théorique et expérimental de $\frac{dZ}{Z}$ qui se trouve confirmée dans les 8 expériences présentées.

Fait important : cette résistance série s'abaisse au cours de l'ouverture des cordes.

La variation électrophysiologique de la résistance de membrane des cordes est une hypothèse séduisante qui s'accorderait avec la théorie de Husson. Elle pourrait peut être rendre compte des boucles observées en voix de fausset par un mécanisme qui reste encore à débattre, mais elle ne joue qu'un rôle probablement restreint en voix de poitrine.

Finalement, des 3 variables envisagées, il est heureux que ce soit la variation mécanique de la résistance série qui domine. C'est à ce prix que l'on peut considérer le glottogramme comme l'image assez fidèle du mouvement des cordes.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- BARNETT, Journal of physiology, Vol 93, n°4, Sept 1938, p.349.
- 2- CHANTEUR J. Le réflexe psycho-galvanique, moyen d'étude des schémas électriques équivalents à la peau. Thèse Faculté de Médecine de Paris.
- 3- COLE KS. and CURTIS HJ., J. Gen. Physiol. 1939. 22. 671.
- 4- FAURE Ph. 1957, Un procédé électrique percutané d'inscription de l'accolement glottique au cours de la phonation : glottographie de Haute fréquence. Premiers résultats. Bull Acad. Nat. Med. 141- 66-69.
- 5- FABRE Ph. 1959, La glottographie électrique en haute fréquence, particularités de l'appareillage CR. Soc. Biol. Paris 153- 1361-4.
- 5¹ FROMY E. Mesures en radiotechnique. Dunod Edit.
- 6- GREMY F. 1957. La voix humaine et le rôle du larynx dans sa genèse. Concours médical 13- VII - 1957- 3377- 3382.
- 7- GREMY F. 1958. Contribution à l'étude oscillographiques de certaines dysarthries. Thèse Faculté de Médecine de Paris.
- 7¹ GREMY F. Considérations sur l'énergie mécanique du larynx durant la phonation. Journal de Physiologie 1960, 52 - 555-567
- 8- GOUGEROT L., FESSARD A., VALLANCIEN B. et GREMY F. (1958) Variations d'impédance laryngée chez un sujet trachéotomisé lors de la dérivation du courant d'air durant un effort phonatoire. J. François ORL 7 - 129,136.
- 9- GOUGEROT L., GREMY F., MARSTAL N. 1960 - Glottographie à large bande passante. Application à l'étude de la voix de fausset - Journal Phys. - 1960, 52, 823-832.
- 10- GOUGEROT L. Des schémas électriques d'impédance équivalents à la peau humaine. J. Radiol. et Electrol. 29 - 1948 - p.479
- 11- GOUGEROT L. Appareil destiné à tracer directement sur l'écran d'un oscillographe cathodique le point du plan complexe représentatif d'une impédance - J. Radio; 32-1951-p. 57.

- 12- GOUGEROT L. Les bases physiques et les méthodes de l'électrophysiologie du neurone- Revue des questions scientifiques T. XV - 20 octobre 1954 - p. 535 - 20 avril 1956 p. 212.
- 13- HUSSON - 1950 - Etude des phénomènes physiologiques et acoustiques fondamentaux de la voix chantée. Thèse Sci. Paris- Rev. Sci. édit.
- 14- HUSSON R. La nature 1957 - 3261 - 3262 - 3267 - , 1959 : 3294, 1961 : 3312.
- 15- FABRE : 1958 Etude comparée des glottogrammes et des phonogrammes de la voix humaine. Ann. Oto-Laryng. 75 n°10-11 - p. 767 - 775
- 16- PIQUET J. et DECROIX G. 1956 - Etude expérimentale préopératoire du rôle de la pression sous-glottique sur la vibration des cordes vocales CR. Acad. Sci. Paris 242 - 12233.
- 17- QUINET J. Théorie et pratique des circuits de l'électronique et des amplificateurs - Dunod Edit.
- 18- ROSENDAL. The conducting properties of the human organism to alternating current - thèse Copenhagen 1940
- 19- SABOURAUD O. et GREMY F. 1958 - Sur la possibilité de mouvements de cordes vocales sans émission sonore. CR Soc. Biol. Paris - 152 - 6 - P 953 .

DUVELLEROY Michel

H 5241

17- 5 - 61

LA GLOTTOGRAPHIE EN MODULE ET EN PHASE
MOYEN D'ÉTUDE DES SCHÉMAS ÉLECTRIQUES EQUIVALENTS AU LARYNX

VU
LE DOYEN
L. BINET

Pour le DOYEN
L'ASSESEUR
J. VERNE

PARIS-JUIN 1961
VU
et PERMIS D'IMPRIMER
LE RECTEUR
DE L'ACADÉMIE DE PARIS
J. SARRAILH

VU, LE PRÉSIDENT DE THÈSE
L. GOUGEROT

VALERIE A
GUTHRIE ET F.
2000-01-15

2000-01-15
GUTHRIE ET F.

UNIVERSITE DE PARIS - FACULTE DE MEDECINE

Année 1960

N°

33

T H E S E

pour

Le DOCTORAT EN MEDECINE

(Diplôme d'Etat)

par

Madame Colette FLEURIDAS, née COLLOT

Le 7 Décembre 1930, à PARIS 13°.

Présentée et soutenue publiquement le

LES BRULURES ELECTRIQUES BUCCO-LINGUALES

de L'ENFANT.

Président : Monsieur FEVRE (Professeur)

DEFINITION & INTRODUCTION

Il s'agit d'un accident électrique d'origine domestique, résultant du contact de la bouche avec un conducteur électrique branché.

- 1°) Les brûlures électriques bucco-linguales sont peu connues du grand public et guère plus de l'ensemble des médecins sans doute en raison de leur rareté. G. LAURENCE en relève 14 observations dans son service en huit ans (de 1950 à 1958), C. GARNIER en 1956 en signale cinq cas en 5 ans, suivis dans le service de chirurgie infantile de l'Hôpital TROUSSEAU. Nous en avons noté 21 en 10 ans (de 1949 à 1959 dans le service du Professeur FEVRE, grâce à son obligeance et à celle de son assistant D. PELLERIN qui nous a fait l'honneur de s'intéresser à cette thèse.

Ces chiffres semblent dérisoires comparés à ceux des hospitalisations globales pour brûlures dans le même laps de temps, chiffres connus pour les services de chirurgie infantile de BRETONNEAU et des Enfants Malades qui sont de huit cent quarante deux pour le premier et de huit cent cinquante huit pour le second.

Outre des cas particuliers, on ne manque pas d'être étonné de l'oubli quasi systématique dans lequel les tiennent la majorité des ouvrages ou thèses consacrés aux brûlures de l'enfant, aux brûlures électriques d'origine domestique et, ce qui est plus grave, à leur prévention.

- 2°) Où réside donc l'intérêt de cette curiosité ?,

- Pour le pédiatre avant tout dans le fait que ces brûlures sont propres à l'enfant, ce qui n'est pas le cas des brûlures électriques d'autre siège et c'est pourquoi nous avons pris la liberté de leur réserver l'exclusivité de ce travail.

- Leur gravité sur laquelle tous les auteurs sont unanimes, mérite également d'être connue. Elles sont graves en tant que brûlures électriques avec la possibilité de mort par électrocution qui y est inhérente. Elles sont graves du fait de leur siège et l'on imagine aisément que la carbonisation d'une, voire des deux lèvres, ou celle d'une commissure labiale, puisse réaliser un préjudice esthétique et fonctionnel parfois irréparable.

- Leur fréquence par rapport aux autres brûlures électriques de l'enfant, mais nous n'avons pour en juger que le cas du service du Professeur FEVRE, est étonnante et inattendue.

En dix ans en effet, vingt trois enfants ont été hospitalisés pour brûlures électriques et nous avons vu que vingt et une d'entre elles étaient de siège bucco-lingual.

Cette proportion se retrouve à peu près identique à la consultation externe de la clinique chirurgicale des Enfants Malades, en ce qui concerne tout au moins les années 1957 à 1960. Sur vingt six brûlures électriques examinées, vingt deux étaient de siège bucco-lingual.

Or, si l'on songe combien ces dernières sont méconnues par rapport aux autres brûlures électriques de l'enfant, celles imputées entre autre aux prises murales pour lesquelles toutes les préventions possibles ont été imaginées et réalisées, on se sent en devoir d'en parler.

- Nous en venons ainsi à ce qui constitue en fait, l'intérêt majeur, la conclusion pratique de ce travail, la prévention de ces brûlures, qui, toutes rares qu'elles soient disparaîtraient avec un avantage certain pour l'enfance.

II - A N A T O M I E

Faisons un court rappel anatomique :

1°) Délimitation anatomique du sujet :

Les brûlures qui nous occupent atteignent essentiellement la portion antérieure de la cavité buccale, à savoir : le vestibule de la bouche, situé en avant des arcades dentaires, derrière les lèvres et les lèvres tant dans leur partie cutanée et muqueuse que dans leurs limites latérales : les commissures labiales.

Elles peuvent déborder sur l'extrémité antérieure des joues, intéresser la partie antérieure des maxillaires, surtout le maxillaire inférieur et l'arcade dentaire correspondante. Nous rappellerons à ce propos que chez l'enfant, le maxillaire outre la denture primitive est le siège des bourgeons dentaires de seconde dentition.

Dans la cavité buccale, la portion mobile de la langue - plus souvent la pointe de celle-ci - et plus rarement, le plancher de la bouche peuvent être en cause.

Le voile du palais, par contre l'est exceptionnellement.

2°) De la conformation extérieure des lèvres, retenons le dessin plus sinueux de la lèvre supérieure surmontée du sillon sous-nasal ou philtrum qui a un intérêt chirurgical topographique.

3°) La musculature des lèvres et des commissures, dont l'atteinte rend compte de la gravité de ces brûlures et des difficultés techniques de reconstitution auxquelles se heurte le chirurgien, est constituée fonctionnellement parlant, par trois catégories de muscles.

Le plus important, seul constricteur de l'orifice buccal est l'orbiculaire des lèvres.

Le plus grand nombre des muscles restants est dilateur des lèvres. Nous nommerons les principaux - pour la lèvre inférieure : le carré du menton ; la lèvre supérieure : les élévateurs de la lèvre, le petit zygomatique ; pour les commissures : les grand zygomatiques et buccinateurs.

Le dernier, même isolé dans sa fonction de "compresseur des lèvres", comme l'indique son nom, est de peu d'importance fonctionnelle.

4°) Vascularisation :

Les lèvres sont irriguées par des branches de l'artère faciale réparties en deux réseaux : l'un superficiel est diffus, l'autre profond, comporte deux artères principales qui longent le bord libre des lèvres ; les artères coronaires.

Accessoirement, la lèvre inférieure bénéficie en outre des apports de l'artère sous-mentale.

Les veines forment un fin et dense réseau avant de gagner les veines faciale superficielle et mentale.

5°) Innervation :

L'innervation sensitive est assurée par le trijumeau, motrice par le facial.

Nous négligeons volontairement la langue qui, chirurgicalement parlant pose peu de problème. Toutefois sa continuité avec l'oropharynx et sa proximité du larynx encore plus, conduisent parfois à consulter en oto-rhino-laryngologie, en raison des risques constitués par son oedème, surtout s'il est important et extensif, gagnant le plancher de la bouche.

III - PHYSIOLOGIE

Autant que leur anatomie et plus encore, devons nous avoir en tête la physiologie des lèvres et de la langue.

1°) Le rôle esthétique de la bouche n'est pas contestable et doit assurément être un des premiers soucis du chirurgien d'enfant.

Plus encore que leur apparence dans l'immobilité compte le jeu des lèvres exprimé dans la mimique et qui confère à un visage une partie de sa vie et de sa personnalité. Or l'enfant a toute sa vie sociale à construire et l'on sait combien pour lui et surtout pour l'adolescent qu'il deviendra, la réussite sera en partie conditionnée par son apparence physique. Or il ne peut être mis en doute qu'une difformité de la face est psychologiquement plus mal supportée qu'une difformité du tronc ou des membres.

2°) La bouche joue un rôle fonctionnel non moins important.

Elle sert à l'admission des aliments et nous verrons qu'une bouche trop petite, inextensible peut constituer un obstacle gênant qui conduit souvent au chirurgien.

Une fois admis, ces aliments solides et liquides plus encore, doivent pouvoir être retenus tant pour la mastication - qui peut à la rigueur s'effectuer bouche ouverte, ce qui n'est pas très esthétique - que pour la déglutition surtout. Cette dernière ne peut s'effectuer correctement que la bouche fermée, là encore, pour les liquides surtout.

Pour des raisons identiques, l'occlusion hermétique des lèvres est indispensable pour assurer la rétention de la salive.

Enfin, il est à peine nécessaire de rappeler le rôle capital joué dans la phonation par lèvres et langue et l'importance d'une mobilité suffisante de ces deux organes pour assurer une bonne articulation.

IV - PHYSIOPATHOLOGIE

Que sont, maintenant, les brûlures électriques et par quel mécanisme local et général agissent-elles sur l'organisme?

Voyons-le, en nous référant le plus possible à notre sujet, ce qui revient à parler de l'action du courant alternatif de basse fréquence, de voltage habituel, qui est le plus souvent de 220 ou de 120 volts.

1°) On oppose les brûlures électriques vraies - par contact - aux brûlures électriques par arc ou étincelles qui s'identifient par leur aspect initial, leur histologie et leur évolution aux brûlures thermiques. En effet, la brûlure résulte, dans leur cas, de la chaleur dégagée au voisinage de la peau par l'arc ou l'étincelle, directement ou par l'intermédiaire de vêtements enflammés par exemple, et non pas de l'action propre de l'électricité.

Elles sont aussi improprement dites électriques que celles dues à un contact malencontreux avec une lampe allumée, un fer électrique ou tout autre appareil électrique dégageant de la chaleur - à condition qu'il ne comporte pas de faute d'isolement - avec cette réserve toutefois que brûlures par arc ou étincelle électriques peuvent accompagner une brûlure électrique vraie.

Dans le cas des brûlures bucco-linguales l'enfant introduit dans sa bouche ou applique sur ses lèvres, la fiche libre d'un fil électrique branché au niveau de sa prise murale. Par l'intermédiaire de la salive et des muqueuses, le contact s'établit entre les deux plots de la fiche, carbonisant ce qu'il traverse - langue, lèvres ou commissure - avec un maximum de lésion à l'entrée et à la sortie du courant de telle sorte que l'empreinte de ces plots est parfois visible sur la surface brûlée. Il s'agit d'une brûlure électrique par contact donc d'une brûlure électrique vraie.

M. PIERRE de MARSEILLE au dernier congrès de chirurgie plastique (Octobre 60) a insisté tout particulièrement sur le rôle de la salive dans la production de ces brûlures. La salive, liquide électrolytique, conducteur de courant électrique, recouvre la muqueuse de la cavité buccale et s'accumule dans le vestibule et la partie antérieure du plancher de la bouche. Elle mouille plus souvent la lèvre inférieure que la lèvre supérieure.

Ces différents faits expliquent sans doute la fréquence et la gravité des brûlures vestibulaires du plancher de la bouche et de la lèvre inférieure.

Lorsque le courant est établi entre les 2 bornes de la fiche, il se produit électrolyse de la salive et les

lésions déterminées sont celles d'une véritable électro-coagulation.

M. PIERRE compare la brûlure au processus de cautérisation par le bistouri électrique.

2°) Quel est le mode d'action locale du courant ? :

a) Poue JELLINECK (1932) l'électricité a une action spécifique. Elle agit sur la membrane des cellules en perturbant son équilibre ionique et aboutit ainsi à la destruction de ces cellules. Ce mode d'action permettrait d'expliquer les lésions à distance de la brûlure électrique si particulières à celle-ci entre autres les lésions vasculaires d'étendue et d'importance toujours imprévisibles et certains autres aspects histologiques qui leur sont propres.

b) en France (FRANCOIS - MOUSSEAU - LEBEAUPIN - THUAUD-KERNEIS) on a tendance à faire jouer un rôle prépondérant à l'effet JOULE.

Les lésions seraient créées par la chaleur dégagée au niveau des tissus traversés par l'électricité avec un maximum d'action à l'entrée et à la sortie du courant selon la formule bien connue :

$$Q = 0,24 RI^2 t.$$

Q chaleur exprimée en calories étant essentiellement fonction du voltage ($RI = E$). "Ce sont les volts qui brûlent, les ampères qui tuent" ZIMMER - et du temps de contact t, exprimé en secondes.

c) Les discussions restent ouvertes. L'accord est fait toutefois sur les caractères propres à ces brûlures électriques vraies.

Ce sont des brûlures du troisième degré au moins, intéressant épiderme, derme, tissu sous-cutané et souvent muscles et os.

Elles ont un aspect nécrotique initial évocateur.

Elles sont indolentes.

On n'en peut préciser la profondeur.

Elles n'ont pas de tendance à la supuration.

L'élimination des tissus mortifiés est lente avec risques d'hémorragies secondaires. En cas d'atteinte osseuse, la sequestration est lente ce qui est une éventualité rarissime au cours de l'évolution des brûlures bucco-linguales.

Enfin, elles donnent lieu spontanément à la formation de cicatrices vicieuses souvent chéloïdiennes.

Les "marques électriques" qui accompagnent souvent les brûlures électriques vraies sous forme de petites exulcérations en coup d'ongle ou ponctiformes, près des points d'entrée et de sortie du courant laissant des cicatrices indélébiles, sont rarement notées ici.

Elles n'ont pas l'intérêt médico-légal qu'elles possèdent dans les brûlures par courant de haute tension où les points d'entrée et de sortie sont parfois discrets. Il est rare que la nature des brûlures bucco-linguales leurs circonstances de survenue laissent place au doute.

3°) Cet accident peut-il être mortel ? :

Il peut l'être en cas d'électrocution simultanée.

Vingt cinq morts par an en France sont dues à des accidents électriques d'origine domestique (FRANCOIS) or, une bonne moitié des brûlures d'origine domestique en général, concernent des enfants de moins de cinq ans (ZIMMER), ce qui laisse supposer qu'une proportion non négligeable de ceux-ci est vraisemblablement en cause dans ce chiffre de mortalité.

a) Voyons successivement les conditions de survenue d'un accident mortel et le mécanisme d'action générale du courant sur l'organisme.

1 - Pour qu'il y ait électrocution, il suffit qu'il y ait une faute d'isolement de l'enfant par rapport au sol surtout.

Ainsi le petit Didier M., Observation n° 34, vu à la consultation externe était pieds nus sur le carrelage de la cuisine que sa mère venait de laver lorsqu'il a porté la fiche à sa bouche.

HAZANJIAN (Boston) signale le cas d'un enfant au contact avec un radiateur électrique qui dans les mêmes conditions fut également électrocuté.

2 - Cette électrocution aboutit-elle fatalement à la mort ? :

Non, heureusement - La mort par électrocution peut être le fait d'une asphyxie par tétanos musculaire généralisé et prolongé donc respiratoire, elle peut être un accident d'origine bulbaire par inhibition des centres cardiaque ou respiratoire. Enfin, elle peut être consécutive à une fibrillation ventriculaire.

3 - Etudions les conditions nécessaires à la survenue de ces différentes éventualités.

- Ø - Le trajet du courant électrique a son importance dans la survenue des deux derniers accidents : inhibition ./.

bulbaire et fibrillation ventriculaire.

Il est nécessaire pour qu'ils surviennent que le trajet intéresse le bulbe et le thorax, ce qui est aisément réalisé à partir d'un conducteur porté à la bouche, le courant gagnant les pieds, le tronc ou l'un des membres selon le siège de la faute d'isolement.

Le thorax peut être épargné il est vrai, si celle-ci se situe au niveau du seul membre supérieur libre, ce qui est une éventualité bien particulière.

- B - L'intensité du courant traversant le corps conditionne surtout la survenue préférencielle d'un de ces accidents mortels puisque rappelons-le, "Ce sont les ampères qui tuent".

x - Une intensité forte d'une vingtaine de milliam-pères, entraîne une contracture musculaire généralisée qui peut projeter l'enfant loin du conducteur avec risque de traumatisme, ou de le faire adhérer à celui-ci ce qui outre l'asphyxie respiratoire entraînée en l'absence de rupture du courant, augmente d'autant la profondeur de la brûlure (facteur temps).

x - Une intensité inférieure à quatre vingts milli-ampères, mais voisine, constitue la condition optimale de survenue d'une syncope bulbaire, l'arrêt des troubles ne se faisant plus à la rupture du courant mais nécessitant des manœuvres de réanimation prolongées.

-x - Une intensité plus forte (égale à quatre vingts milliam-pères - KOEPPEN - DAZIEL - SPENCE et selon FRANCOIS), le trajet intéressant le thorax, rend possible la fibrillation ventriculaire avec toutefois la nécessité d'un temps de contact suffisamment prolongé puisque la fibrillation ne peut être déclenchée que par passage du courant pendant la période dite "réfractaire partielle" qui succède immédiatement à la systole (un cinquième du cycle de révolution du coeur) soit un cinquième de seconde par seconde.

x - Comment une telle intensité peut-elle être atteinte avec le courant domestique et chez l'enfant ? :

Là encore, le rappel de quelques notions de physique, bien connues, va aider à le comprendre.

On sait que l'intensité traversant un conducteur est inversement proportionnelle à sa résistance (Loi d'Ohm).

$$I \text{ Ampères} = \frac{E \text{ Tension en volts}}{R \text{ Résistance en Ohms}}$$

La tension est connue et égale à 220/210 ou 120/127 volts ; la résistance seule est variable : la résistance du corps humain est égale à la résistance de la peau, ou des muqueuses, à l'entrée et à la sortie du courant, additionnée de la résistance du milieu in-

terne.

Chez l'enfant, cette dernière mal connue, est inférieure à cinq cents Ohms.

La résistance des muqueuses est d'environ mille Ohms ; celle de la peau sèche d'environ quatre mille Ohms, d'une peau humide ou de chaussures mouillées, de quelques centaines d'Ohms.

Dans les circonstances habituelles de survenue des brûlures bucco-linguales, la résistance peut donc varier de 5.500 Ohms au maximum à 2.000 Ohms au minimum, et par là même, compte tenu des variations possibles du voltage, de 20 à 110 milliampères (20 - 40 - 55 et 110 milliampères plus exactement).

Toute la gamme des accidents que nous avons énumérés est donc réalisable.

Nous répétons toutefois que la mort n'est nullement inéluctable en cas d'électrocution et que même en cas d'accident susceptible d'être mortel, des manoeuvres appropriées - de ranimation surtout - outre l'électrochoc et le massage cardiaque destinés à lutter contre la fibrillation ventriculaire - peuvent justifier l'espoir d'une survie.

V - ANATOMO - PATHOLOGIE

Nous avons laissé entrevoir les problèmes physio-pathogéniques posés par les lésions histologiques de ces brûlures électriques. Nous allons en outre, essayer de mettre en lumière leur intérêt thérapeutique.

(A) - L'aspect immédiat des lésions est typique

1/ Macroscopiquement, la brûlure des lèvres et des commissures comporte un centre déprimé par un cratère carbonisé, gris ou brun, d'étendue plus ou moins importante, cerné d'une oréole grisâtre, de téguments ou de muqueuse surdé nivelés par rapport à lui, qu'entoure un halo d'érythème.

La brûlure de la langue offre le plus souvent un aspect tout à fait caractéristique d'amputation à tranche nette d'un jaune grisâtre constituée par les tisons coagulés.

Dans les deux cas, l'empreinte des plots peut être visible sous forme de deux dépressions arrondies en carde en cas de fiche femelle - cas le plus fréquent-.

2/ Microscopiquement, les brûlures des lèvres méritent surtout l'intérêt. Elles montrent la coagulation nécrotique des tissus. Au cratère central correspond une zone noirâtre de tissus carbonisés intéressant épiderme et derme qui prennent un aspect poreux. Des fragments d'épiderme peuvent manquer correspondant aux empreintes des plots.

Les cellules basales de la couche malpighienne sont étirées, les cellules restantes vacuolisées, d'aspect arrondi. Le derme est ou ischémié ou gorgé de sang - à proximité des zones carbonisées, les fibres du collagène étant gonflées.

A l'oréole rougeâtre correspond grossièrement la zone des vaisseaux endommagés, veines et artères. Les veines sont souvent affaissées, vidées de sang. Comme celles des artères, leurs parois sont épaissies par les lésions pariétales. Le noyau des cellules musculaires de la média est spiralé, les cellules de l'intima nucléolées quand elles ne sont pas détruites, expliquant les thrombi à leur contact. L'ensemble justifie le dogme de l'impossibilité immédiate de délimitation de ces brûlures électriques et explique avec les hémorragies lors de la chute de l'eschare, la lenteur de guérison.

Les nerfs sont détruits et l'indolence des brûlures est donc compréhensible.

Les muscles parfois coagulés, perdent leur aspect strié caractéristique. Ils sont dégénérés, les noyaux restant affectant un aspect spiralé comme ceux des muscles des vaisseaux. A ces lésions microscopiques correspond un aspect de boeuf bouilli à l'oeil nu propre aux brûlures électriques.

(B) - L'évolution de ces lésions ne manque pas non plus d'intérêt.

1/ Dès la quatrième heure et jusqu'à la douzième heure environ, se constitue un oedème à la périphérie de l'eschare qu'il délimite soit dans le tissu sous-cutané, soit dans le muscle selon la profondeur de la brûlure.

Cet oedème, connu depuis longtemps, visible à l'oeil nu, a été à l'origine des interventions précoces qui négligeaient malheureusement la zone des thromboses vasculaires, située à sa périphérie (VOLNEY - HYSLOP). Les échecs des interventions ont été à l'origine des notions fausses en partie de "nécrose progressive" des tissus brûlés par l'électricité, avec pour corollaire, l'abstention thérapeutique avant toute délimitation spontanée des zones nécrotiques sauf s'il s'agissait de protéger des structures importantes comme une articulation par exemple. (DALE).

2/ A partir du quatrième jour, l'examen histologique, montre une extravasation des leucocytes, témoin vraisemblable de l'infection débutante, avec ébauche d'un sillon d'élimination de l'eschare.

Dès ce stade, l'excision suivie de reconstitution doit ses échecs non plus aux lésions vasculaires, mais à l'infection (GOSSET - MUIR - MARIE et DAIRE).

L'élimination spontanée des tissus mortifiés s'effectue entre le dixième jour et la troisième semaine. Les hémorragies secondaires sont alors possibles.

VI - CLINIQUE

Ces notions préliminaires établies, abordons la clinique à la lumière des quarante trois observations de brûlures électriques bucco-linguales recueillies dans le service du Professeur FEVRE, en nous aidant dans la mesure où elles complètent les nôtres, des observations recueillies dans la littérature médicale.

1°) Rappelons les circonstances de survenue de ces brûlures ; Elles sont à peu près toujours identiques et nous ne pensons pas pouvoir mieux dire que GARNIER, c'est pourquoi nous reprendrons les termes mêmes de l'exposé qu'il en fit aux entretiens de Bichat de 1956 (Il avait limité son sujet aux brûlures de la lèvre inférieure). "Certains appareils électriques d'appartement (fers à repasser - poste de T.S.F.) sont reliés à leur prise de courant murale par un fil portant une fiche à chaque extrémité. La fiche murale restant en place, il arrive que l'utilisateur débranche l'appareil, laissant traîner par inadvertance, l'autre fiche. L'enfant, mal surveillé, s'en empare, la porte à sa bouche. La lèvre inférieure est instantanément et gravement brûlée sur un segment plus ou moins étendu de son pourtour, pourtant le contact n'a duré que quelques secondes."

Seuls BROWN et FRYER parlent d'un autre mode de survenue de ces brûlures : par morsure du fil électrique lui-même.

Sur nos quarante trois accidents, trente quatre ont eu lieu dans les conditions habituelles, dont vingt sept avec certitude, neuf étant attribués "au courant électrique" sans plus de précisions et les six derniers ne comportant pas mention de l'agent de brûlure.

Dans un cas la fiche était protégée. Il s'agissait dans la majorité des cas de fiches femelles.

2°) Si l'on consulte la courbe des âges de ces enfants, on constate que le plus jeune a sept mois, le plus vieux - un isolé - dix ans. Le plus grand nombre d'entre eux (vingt sept sur quarante deux) a entre neuf et vingt mois, avec quelques cas isolés autour de trois ans et trois cas à quatre ans et demi.

Pourquoi le petit enfant paie-t'il le plus lourd tribut à ce genre de brûlures ? Sans doute parce qu'il est à l'âge de l'exploration du monde extérieur rendue possible par la récente acquisition de la marche, à l'âge où l'on ignore le danger et surtout où l'on porte encore à la bouche l'objet de ses convoitises.

3°) Aussitôt après l'accident l'aspect de l'enfant est particulier. Il se présente bouche ouverte ce qui lui donne une expression hébétée, ne cherchant pas à retenir la salive qui s'en échappe, tenant la langue hors de la bouche lorsqu'elle est atteinte. Les téguments ont une coloration normale, il n'est pas choqué. Il est parfaitement conscient. Il ne pleure pas parce qu'il ne souffre pas mais ses lèvres ou sa langue insensibles sont devenues pour lui des corps étrangers dont il ne semble plus savoir que faire.

Son regard est parfois anxieux mais on ne peut s'empêcher de penser au rôle joué dans cet état par l'affolement compréhensible de sa mère.

4°) Les garçons semblent plus souvent en cause que les filles. Sur quarante trois enfants, nous en dénombrons vingt sept pour quatorze filles, deux enfants à prénom de genre indéterminé, n'ayant pu être classés.

5°) Le siège des brûlures a plus d'intérêt. Pour quarante deux d'entre elles, il est connu ; unique dans trente six cas : il s'agit huit fois de la langue, neuf fois de la lèvre supérieure, neuf fois de l'inférieure. Il est multiple dans les six cas restants, à savoir : langue et commissure labiale deux fois ; langue et lèvre inférieure deux fois ; langue et deux lèvres une fois ; deux lèvres seules une fois. Dans vingt trois de ces quarante deux cas la langue était intéressée.

Nos brûlures des lèvres n'ont pas entraîné la mise à nue de la denture comme dans le cas décrit par DALE en 1954.

Elles n'ont atteint ni les joues, ni le menton, ni le palais surtout, comme chez l'enfant dont parle BROWN et FRYER.

Nous n'avons pas observé non plus d'atteinte de l'arcade dentaire inférieure avec chute des incisives de première dentition comme en décrivent les Américains " ZARAZTADH, HAZANJIAN, ARAM - POUPENIAN, de Boston, comme en montre l'allemand GABKA de Berlin.

Voyons ces différents sièges dans le détail en sachant que nos investigations seront limitées par le fait que plus de vingt de nos dossiers proviennent de la consultation externe avec des détails nécessairement limités.

a/ Sur dix huit atteintes linguales, il s'agissait 8 fois de la pointe seule, 6 fois l'étendue n'a pas été précisée, 2 fois il s'agissait de la face dorsale, isolément ou associée à une brûlure de la pointe, 1 fois enfin la brûlure de toute la portion mobile de la langue avec impossibilité à la protraction a justifié qu'on demande à revoir l'enfant en vue d'une plastie éventuelle. //

tuelle du frein.

b/ Les limites de l'atteinte des lèvres supérieures sont précisées dans peu de cas. La brûlure de Laurent S..., Obs. N° 19, intéresse la moitié droite de la lèvre supérieure dans sa partie rouge, n'atteignant pas la commissure débordant en haut légèrement sur la lèvre blanche. Celle de Frédérique L..., Obs. N° 36, est située à droite de la ligne médiane sans plus de précisions et s'accompagne d'une brûlure de la gencive du même côté. Nous n'avons aucune précision de siège au sujet des six enfants restant. Pour la majorité des auteurs la discrétion de ces brûlures est la règle (HAZANJIAN). GARNIER n'en connaît pas.

c/ Les brûlures de la lèvre inférieure, habituellement plus fréquentes que celles des lèvres supérieures (HAZANJIAN - GARNIER) sont ici d'égale fréquence. Rappelons à leur propos la classification de GARNIER qui opposait les brûlures localisées à toute l'épaisseur de la lèvre à celles qui n'intéressaient que sa superficie. Les premières pouvaient s'accompagner d'une atteinte de la muqueuse vestibulaire dans sa portion mandibulaire aboutissant à une adhérence lèvre os plus ou moins importante ; nous en avons deux cas : un premier en la personne de Brigitte G..., obs. N° 17, une malade du Professeur FEVRE ; un second en celle de Loïc H... obs. N° 13. Nous avons un cas de brûlure superficielle chez Violette B... obs. N° 18, une enfant malade de D. PELLERIN.

GARNIER signalait que les brûlures médianes de la lèvre inférieure semblaient s'accompagner plus volontiers de brûlure de la langue sur onze brûlures, nous ne l'avons vérifié que deux fois.

Elles sont graves car souvent étendues, nous en avons un cas : celui d'Alain H... obs. N° 2.

d/ GARNIER rapprochait un peu des brûlures de la lèvre inférieure les brûlures commissurales, ce qui va nous permettre d'en parler maintenant.

Nous ne possédons que deux cas de brûlure commissurale dont un seul complet et isolé. L'autre ne concernant que la muqueuse au voisinage de la commissure et accompagnant une brûlure de la langue. D'autre part, nous n'avons aucun recul sur ces brûlures. Fôrmes nous est donc de parler de ce que nous avons lu à leur propos.

Il semble que ce soit les plus graves des brûlures bucco-linguales avant tout en raison de leur évolution spontanée. Après la chute de l'eschare les parties des lèvres intéressées adhèrent l'une à l'autre, rétrécissant l'anneau buccal asymétriquement, avec plus qu'ail-

leurs propensions aux cicatrices exubérantes et rigides. Nous en reparlerons à l'évolution.

e/ La brûlure simultanée des deux lèvres n'intéressant pas les commissures, isolée ou non, pose les problèmes particuliers que soulevaient chacune des brûlures qui la composent, si elle était unique. Il est peu probable que, comme dans le cas des brûlures commissurales une adhérence des deux lèvres se produise. Nous n'avons jamais rien lu de semblable. B... Eric, obs. N° 41 entre dans ce cadre avec une brûlure modérée n'intéressant qu'une portion des lèvres rouges.

DALE par contre, parle d'un enfant dont l'atrocité brûlure englobait entre autre, toute l'épaisseur des deux lèvres.

6°) Quel a été le délai qui a séparé l'accident de la première consultation, et quelle a été la cause de celle-ci ?

Vingt sept fois l'enfant a été vu dans les vingt quatre premières heures, souvent dans les heures qui ont suivi la brûlure sans qu'on puisse donner plus de précisions.

Deux fois la consultation a eu lieu le deuxième jour, une fois le troisième, une fois le quatrième, une fois après plusieurs jours, trois fois le huitième jour, une fois le dixième, une fois le quatorzième, une fois le quinzième, une fois plus d'un an après. Enfin deux fois ce délai n'est pas précisé.

Il est permis de penser que dans ces cas vus tard le médecin traitant était intervenu.

Dans la majorité des cas, trente cinq sur quarante trois cette consultation fut motivée par la brûlure, dans onze cas par une complication. La consultation fut multiple - trois au maximum - sept fois seulement.

7°) Sur quarante deux enfants, vingt et un ont été hospitalisés. Voyons dans quel délai et pour quelles raisons :

Quinze enfants ont été hospitalisés immédiatement ou peu après la brûlure, six pour une complication survenue une fois "plusieurs jours" après celle-ci, deux fois huit jours, une fois dix jours, une fois dix neuf jours, une fois un mois plus tard, puis dans ce dernier cas à plusieurs reprises pendant les dix-huit mois qui ont suivi et une fois trois mois et demi après.

8°) Quelle a été la durée d'hospitalisation ?

Huit fois elle a été de vingt quatre heures, simple mise en observation, deux fois de quarante huit heures, sept fois de moins de dix jours - trois - quatre - cinq

six, sept, huit et neuf jours respectivement) cinq fois enfin de plus de dix jours (onze, douze, treize, dix-neuf et plus pour l'enfant qui a subi des interventions itératives).

Cette durée d'hospitalisation ne voit pas son coût accentué, comme chez l'adulte, par le fait qu'elle représente une durée d'incapacité fonctionnelle, néanmoins on a toujours l'espoir qu'un traitement plus adapté pourra la réduire à son minimum ou supprimer les hospitalisations par complications tout au moins, sachant qu'une hospitalisation est toujours un traumatisme psychique pour le jeune enfant.

9°) Quelle a été l'évolution de ces brûlures bucco-linguales ?

Rappelons qu'en raison de leur indolence, les enfants dont la lésion n'entraîne pas de déficit labial quantitatif trop important, s'alimentent normalement.

Deux étapes importantes marquent l'évolution en dehors des complications que nous verrons à part, ce sont la chute de l'eschare et la cicatrisation.

A part les formes où l'hospitalisation a été suffisamment longue, et elles sont peu nombreuses, motivées essentiellement par les hémorragies de chute de l'eschare, les délais séparant ces deux étapes de l'accident initial sont rarement connus. GARNIER donne le chiffre de 10 jours pour le délai moyen de chute de l'eschare. Sur les dix cas que nous possédons, nous relevons les chiffres de vingt quatre heures une fois, neuf jours deux fois, dix jours trois fois, onze jours une fois, quinze jours une fois, vingt jours une fois, un mois une fois.

Seul le premier de ces chiffres est aberrant, avec une explication plausible toutefois. Nous pensons que cette chute d'eschare précoce, très hémorragique puisqu'elle a motivé des perfusions sanguines est en rapport avec la constitution d'un hématome sous l'eschare secondaire vraisemblablement à la rupture de quelques uns des vaisseaux lésés. L'hypothèse d'un trouble de la crase sanguine ou rajoutée n'est pas impossible compte tenu de la gravité des hémorragies. Elle n'a malheureusement pas été vérifiée.

Les délais de cicatrisation sont encore plus rarement connus : cinq fois seulement.

Ils sont de neuf jours une fois, vingt deux jours une fois, un mois trois fois.

Là encore, le premier chiffre est discordant. Il concerne une brûlure de la lèvre supérieure dont il est permis de douter de la nature électrique vraie et qui é-

voque une brûlure thermique par arc ou étincelle.

10°) Quelles ont été les complications de ces brûlures :

a/ Une seule complication immédiate chez nos quarante trois enfants : la crise convulsive du petit Didier M... obs. N° 34 que sa mère a trouvé la fiche dans la bouche les yeux réversés et ayant perdu ses urines. Rappelons que Didier M.... était pieds nus sur le carrelage. Il est permis d'expliquer purexpliquer cette crise, un tétanos respiratoire avec anoxie cérébrale puisqu'il a suffi de débrancher la fiche murale pour que l'enfant reprenne conscience.

Nous n'avons pas eu connaissance d'électrocutions mortelles bien qu'elles existent (l'une est relatée récemment dans un quotidien) Nous avons parlé plus haut du cas décrit par HAZIJIAN.

Répetons que l'accident n'a été suivi d'aucun choc d'aucun trouble de conscience chez aucun de nos enfants mais que M. PIERRE signale l'un et l'autre chez certains des 11 cas dont il parle.

b/ Les complications précoces sont rares. Il s'est agi d'un edème extensif de la langue chez un de nos enfants pour lequel nous avons demandé la présence d'une canule d'intubation à proximité (T... Dominique, Obs. N° 6).

Pour un autre cet edème signalé au cours de l'examen n'a pas été l'auteur de trouble (S... Clémence, Obs. 35)

Selon M. PIERRE cet edème peut être considérable, entraînant dysphagie et troubles respiratoires.

Une fièvre modérée ($37^{\circ}5 - 38^{\circ}5$ max.) a été notée chez dix des hospitalisés.

On s'explique facilement, en raison de la discrétion relative des brûlures, l'absence des complications rénales ou pulmonaires signalées chez l'adulte, plus vulnérables, il est vrai au décès de brûlures électriques par haute tension.

c/ Les complications secondaires se résument pratiquement aux hémorragies de chute d'eschare. Le tétanos étant habituellement prévenu par antitoxine ou sérothérapie.

- Les hémorragies liées à la chute de l'eschare ne semblent pas fréquentes. Sur vingt et un hospitalisés, quatre en ont souffert.

Deux fois elles n'ont nécessité aucune intervention
./.

- 19 -

en raison de leur discrétion ; une fois elles ont motivé une petite perfusion sanguine hémostatique de 30 cc N. DINH, Obs. N° 12 ; une fois l'anémie menaçante a fait prescrire la perfusion de 650 cc de sang en deux fois, O... Dominique, Obs. N° 5.

- Les infections après chute de l'eschare sont latentes. Peut-être justifient-elles certains états fébriles tardifs. N. DINH, Obs. N° 12, Catherine K..., obs. N° 16, H... Loïc, Obs. N° 13, François C..., obs. n° 14.

M. PIERRE toutefois observe sur les 11 cas qu'il rapporte des complications pulmonaires bronchitiques, des complications digestives qu'il attribue à la déglutition des lambeaux nécrosés et infectés des lèvres.

Est-on en droit de classer dans les complications secondaires le retentissement sur la cicatrisation d'un état général déficient ? Ce problème rare sur ce terrain ne s'est posé qu'une fois pour nous chez Alain H..., obs. N° 2, après une anorexie tenace en rapport avec des hospitalisations itératives et prolongées.

4/ Les complications tardives :

Nous entendons par là celles qui suivent la cicatrisation.

Elles se voient essentiellement au cours de l'évolution des brûlures des lèvres - lèvre inférieure en particulier - et des commissures puisque ce sont les plus graves.

Ces complications sont esthétiques et fonctionnelles encore que cette distinction soit un peu arbitraire puisque leur association est fréquente. En effet, les complications esthétiques résultent ou d'un déficit pariétal important, ou d'un vice de cicatrisation, parfois des deux or ce sont ces mêmes complications qui entraînent une gêne fonctionnelle.

Nos cas hospitaliers nous inciteraient à l'optimisme si nous n'avions rien lu à leur sujet.

A qui tient le petit nombre de nos complications tardives ? , sans doute au fait que nos cas sont peu graves intéressant exclusivement la langue dans près de la moitié d'entre eux ou restent limités dans leur étendue lorsqu'ils touchent les lèvres.

Il semble toutefois que le petit nombre de cas auxquels se réfèrent les auteurs qui ont écrit sur les

brûlures électriques bucco-linguales nous ont rîs à plus d'optimisme qu'eux.

Envisageons ces complications selon leur siège.

a/ Les brûlures des lèvres inférieures : donnent lieu sans aucun doute aux complications tardives les plus fréquentes.

Pour cinq de nos enfants elles ont motivé la première consultation chirurgicale ou l'hospitalisation.

Vi lette B... obs. N° 18 a été examinée un mois après son accident pour une cicatrice rétractile médiane de la lèvre inférieure descendant vers le menton sur la lèvre blanche - voir photo -

C'est également pour une cicatrice médiane et verticale de la lèvre inférieure, mais adhérent celle-ci à la muqueuse mandibulaire, comblant le vestibule sur la ligne médiane, qu'a été amenée Brigitte G... obs. N° 17 treize mois après sa brûlure. Cette cicatrice se poursuivait sur la lèvre blanche, englobant la lèvre rouge en son centre et constituait donc une double gêne esthétique et fonctionnelle.

Alain M... Obs. N° 2, est venu consulter pour la première fois un mois environ après sa brûlure pour une chélide importante de la lèvre inférieure.

H... Luc a été revu à sa consultation par D. PELLERIN un mois environ après l'hospitalisation qui a suivi sa brûlure, pour une cicatrice assez importante de la lèvre inférieure et surtout un déficit à l'emporte-pièce de la lèvre rouge par où s'écoulait une salive abondante.

G... Alfredo, Obs. N° 14 enfin a été admis trois mois et demi après sa première consultation pour une petite cicatrice de la lèvre inférieure siégeant en regard de l'incisive gauche, qu'elle découvre en partie, formant un sillon écharnant d'avant en arrière le bord libre de la lèvre (voir photo).

Reprenons donc en nous aidant des apports de GARNIER par ordre de gravité décroissante et à la lumière de ces cas, ces différentes complications.

Au minimum, il peut s'agir d'une cicatrice médiane discrète de la lèvre inférieure, intéressant surtout la lèvre rouge où elle peut être rétractile (Vi lette B... obs. N° 18, G... Alfredo obs. N° 14).

./.

La chéloïde médiane, discrète de la lèvre rouge est également peu grave car elle s'atténue avec le temps (GARNIER).

Les brûlures superficielles plus étendues de la lèvre inférieure s'organisent par centre suvent en un bloc chéloïdien (GARNIER.)

Nous ne possédons pas d'exemple de ces deux derniers ordres.

Les complications qui succèdent à une brûlure de toute l'épissure de la lèvre laissent suvent une brèche à l'emporte-pièce où a disparu lèvre rouge seule (selon GARNIER) ou parfois également une partie de la lèvre blanche. Alain M... obs. N° 2. Ce sont ces brûlures, rappelons-le, qui intéressent volontiers la gencive aboutissant à une fusion lèvre, os, qui comble tout ou partie du vestibule et immobilise la lèvre (Brigitte G. obs. N° 17) Elles peuvent également se compliquer de la constitution d'un bloc chéloïdien massif (selon GARNIER).

b/ Les brûlures commissurales : auraient une évolution un peu identique, la cicatrice suvent chéloïdienne suvant la commissure au maxillaire inférieur, englobant la majeure partie des lèvres adjacentes avec asymétrie de l'anneau buccal sans compter l'obstacle constitué par une bouche trop petite et inextensible, gagnant parfois joue et menton (selon GARNIER - HAZANJIAN).

A quoi tient cette tendance des cicatrices à devenir chéloïdiennes ? Deux conditions habituelles en chirurgie locales et générales, sont ici réunies. Ces chéloïdes succèdent à des brûlures profondes du troisième degré au moins dont la réparation ne peut s'effectuer que de la périphérie vers le centre. Ici cette réparation doit se faire en outre sur un sous-sol de mauvaise qualité, infecté et comportant des lésions vasculaires.

Mais elles sont, sans aucun doute, en rapport avec le terrain sur lequel elles surviennent et comme il est commun de l'observer en pareil cas. Nous ne pouvons manquer d'être frappé par le fait que quatre de nos enfants : Brigitte G... obs. N° 17, Violette B... obs. N° 18, Alfredo G... obs. N° 14, et H... Loïc obs. N° 13, ont constitué de simples cicatrices, rétractile pour Violette et importante certes pour Brigitte, mais sans ombre de réaction exubérante du conjonctif dans les conditions mêmes qui ont permis à Alain M... sa première chéloïde. L'évolution semble confirmer nos dires au sujet d'Alain puisque de multiples interventions justifiées par une autre cause il est vrai (rétraction de greffes) se sont toutes soldées - même au niveau du prélèvement des greffons - par des chéloïdes monstrueuses.

c/ Nous ignorons tout de l'évolution des brûlures des lèvres supérieures sinon qu'elles sont moins fréquentes et surtout moins graves que les précédentes.

d/ Les brûlures de la langue ne donnent lieu habituellement à aucun trouble fonctionnel pour les raisons sans doute qui font qu'un frein de la langue trop court n'en entraîne aucun.

Toutefois, si la base de la langue est soudée par un bloc chéloïdien au plancher de la bouche, on peut craindre une gêne de la parole et de la déglutition. Nous ne l'avons jamais observé, si nous l'avons craint une fois chez l'H... Fabrice, Obs. N° 38 - HAZANJIAN en parole.

e/ La brûlure des dents de première dentition et de leurs alvéoles, signalée dans la littérature se solde par une chute de ces dents sans atteinte habituelle de la seconde dentition.

Nous aurions pu observer un retentissement sur ces dents permanentes dans un cas différent, celui d'Alain M. obs. N° 2, du fait d'un trouble de croissance du maxillaire inférieur lié à la compression de la bride retractile horizontale qui lui tenait lieu de lèvre inférieure après sa première intervention.

f/ Nous n'avons pas parlé des troubles de la rétention et de la déglutition des liquides, des troubles de la phonation : Ils font cependant partie des complications tardives des brûlures électriques bucco-linguales, et apparaissent dès qu'un déficit suffisamment important de l'orbiculaire est réalisé. Ils sont constants au cours des brûlures étendues des lèvres et des commissures (cas évoqués par DALL puis BROWN et FRYER).

g/ Les séquelles : se confondent parfois avec les complications tardives auxquelles elles font suite par exemple en cas de chéloïde résiduelle modérée ou d'échec du traitement - pour les cas justiciables d'une intervention.

Elles vivent donc surtout des possibilités limitées et des échecs de la chirurgie et nous les envisagerons en étudiant les résultats de celle-ci.

Il n'est nulle part fait mention de troubles sensitifs résiduels ou de névralgies séquelles, spontanés ou après intervention.

Le diagnostic de ces brûlures ne se pose pratiquement pas.

1) Les brûlures chimiques sont plus diffuses, moins profondes et il est rare que le causatif en cause ne soit pas retrouvé.

2) Les brûlures thermiques surviennent aussi dans des conditions différentes, sont souvent moins profondes et n'ont pas l'aspect caractéristique de la brûlure électrique à profondeur égale. La restriction du cas des brûlures par arc ou étincelle électrique doit être rappelée ici, et nous avons vu que le problème est posé pour l'un de nos enfants.

VII - TRAITEMENT.

C'est pour pallier les complications des brûlures électriques bucco-linguales et les prévenir dans la mesure du possible que de multiples suggestions d'interventions réparatrices ont été proposées. Est-il besoin de dire qu'aucune d'elles n'apporte "la" solution puisque chaque enfant pose un problème particulier ?

1°) En fait, un seul traitement peut espérer l'efficacité totale et, comme toujours c'est le traitement préventif.

Il faut supprimer les fils électriques intermédiaires connus sous le nom de "rallonges" ou "prolongateurs de prise de courant", ou bien faire en sorte que leur fiche distale soit rendue inoffensive. Elle peut l'être soit en étant placée hors d' portée de l'enfant, soit mieux en étant rendue solidaire de l'appareil qu'elle relie à la prise de courant ce qui est facilement réalisable à l'aide d'une cellophane ou d'un tissu adhésifs (Scotch, Chatterton, etc...). Ce simple procédé assure la protection totale des jeunes enfants et surtout ôte la tentation à l'utilisateur de débrancher au niveau de la fiche intermédiaire.

Enfin il serait souhaitable qu'une propagande soit effectuée par T.S.F., Télévision et publications de vulgarisation scientifique, pour porter à la connaissance du grand public le danger de ces brûlures et les moyens simples à mettre en oeuvre pour qu'elles disparaissent.

2°) Abordons maintenant le traitement curatif.

Une fois encore, nous ne prétendons pas apporter un schéma thérapeutique standard, nous ne pouvons que suggérer certaines lignes de conduite que nous avons cru voir se dégager des témoignages des chirurgiens d'enfant qui ont publié sur ce sujet, et de notre propre expérience.

Nous nous sommes aidés pour la partie technique des apports de la chirurgie des malformations congénitales des lèvres (becs de lièvre, fissures labiales) et plus accessoirement de la chirurgie d'adulte (interventions pour tumeurs et plaies de guerre).

I - Traitement médical :

a) Nous serons brefs sur les mesures médicales pré-

coces à prendre habituellement.

Le geste le plus important est celui de l'injection de rappel d'anatoxine si la vaccination antitétanique complète est lointaine (plus de trois ans - cinq ans au plus), ou de sérum antitétanique. Il serait logique de profiter de cette dernière pour mettre en train la vaccination antitétanique mais cette mesure n'est pas réalisable dans les consultations externes de chirurgie. On peut s'en consoler chez l'enfant en pensant qu'il est préférable pour lui d'entreprendre une vaccination associée et conseiller aux parents de s'en charger le plus rapidement possible.

Une radiographie du crâne peut être pratiquée en cas de chute avec perte de connaissance (Didier M... obs 34)

Des lavages de bouche à l'eau oxygénée diluée dans de l'eau bouillie peuvent être prescrits après les repas, remplacés par des attouchements de la brûlure à l'aide d'un bourdonnet de coton chez les plus petits.

Les antibiotiques par contre ne sont pas systématiquement administrés.

Enfin, les parents et le médecin traitant seront prévenus des hémorragies possibles lors de la chute de l'eschare et de l'intérêt d'une hospitalisation en pareille éventualité.

b) Nous pouvons inclure dans la partie médicale du traitement les soins nécessités par ces hémorragies : à l'entrée de l'enfant, outre un examen médical soigneux et répété étudiant couleur des téguments et surtout des muqueuses, pouls, tension entre autres des examens complémentaires de routine sont habituellement pratiqués : numération globulaire - groupage sanguin - étude de la crase sanguine.

Des hémostatiques mineurs généraux (Adrénoxyl - hémostatique Eacé, etc...) peuvent être administrés associés à l'application locale de thrombase.

Enfin, en cas d'hémorragie importante soit du fait de sa répétition, soit du fait de son abondance, entraînant une chute marquée brusque ou progressive des globules rouges, une perfusion sanguine pourra être envisagée, en s'aidant des critères habituels qui procèdent à son indication.

c) N'omettons pas de parler de l'intervention stomatologique éventuellement nécessitée par la chute des

incisives de première dentition. Rappelons l'utilité de prothèse dentaire chez l'enfant pour permettre une alimentation correcte et surtout éviter des déformations du maxillaire avec son retentissement sur les dents de seconde dentition.

d) Nous ne serions pas complets si nous n'évoquions l'utile secours apporté comme toujours à la chirurgie esthétique par le grimage, chez la fille surtout dès l'adolescence, dans les cas graves ayant motivé de nombreuses interventions.

II - Traitement proprement chirurgical :

A - METHODES -

Elles visent toutes à redonner à la bouche le maximum de naturel dans l'apparence et d'efficacité dans le fonctionnement.

1° - Date des interventions :

a) Les interventions précoces :

Avantages :

Elles ont pour elles, le fait de s'effectuer dans d'assez bonnes conditions locales. En effet, il n'y a pas de cicatrice à extirper, les tissus sont souples, il n'y a pas encore d'infection. La délimitation des tissus mortifiés est relativement facile entre la 4^o et la 12^o heure grâce à leur cerne d'œdème.

Le seul obstacle à vaincre est celui de la zone des vaisseaux lésés à extirper assez largement pour éviter le risque des réinterventions mais sans outrance pour conserver un maximum de tissus sains (Volney - Hyslop). Cette intervention précoce permettrait seule de ne pas se leurrer sur la profondeur réelle des brûlures.

Quant à l'évolution et aux résultats ils seraient également encourageants. Les complications précoces et secondaires (rares en fait) sont évitées puisque la guérison est accélérée et que les récupérations fonctionnelles et esthétiques semblent d'emblée des plus favorables (voir photos).

Inconvénients :

Ils résultent des difficultés d'appréciation des limites de la zone des vaisseaux lésés d'où la possibilité de lâchage de suture ou d'échec de greffe et la nécessité des réinterventions (Marie et Danies).

- Dates des interventions :

L'intervention peut être très précoce dans les douze premières heures (Volney - Hyslop).

Elle peut être secondaire précoce dans les quatre premiers jours. MUIR opère dans les trois premiers jours (1958).

MARIE et DAVIES dans les quatre premiers jours (1959)

b) Les interventions secondaires :

Ont lieu avant ou après la chute de l'eschare mais avant la cicatrisation.

Avantages :

La délimitation de l'eschare est nette à ce stade, les tissus cicatriciels encore absents.

Inconvénients :

Elles ont contre elles le fait que dès le quatrième jour existe une infection latente qui risque de faire lâcher les sutures et échouer les greffes.

Cette difficulté peut être en partie évitée, il est vrai, en cas de greffe par le choix préférenciel des greffes pédiculées (MUIR 1958).

- Dates des interventions :

DALE et CAUTAB (Avril 1954) interviennent après délimitation spontanée des tissus mortifiés sans plus de précision.

Ces interventions précoces ou secondaires ne sont jamais indiquées en cas de brûlure de la langue.

c) Les interventions tardives

Avantages :

Elles réalisent la période la plus favorable pour l'intervention. Elles échappent en effet aux risques d'une délimitation périlleuse précoce de l'eschare, aux aléas des greffes et sutures en tissus infectés.

Inconvénients :

Effectuées sur des chéloïdes, elles acceptent d'affronter le barrage des tissus cicatriciels envahissants.
./.

et s'exposent aux pires difficultés techniques, aux résultats les plus décevants.

- Date des interventions :

Ces interventions tardives rallient l'opinion de la majorité des chirurgiens infantiles français.

GARNIER, en 1956, parle essentiellement des interventions sur chéloïdes.

LAURENCE, ANGLADE, SOULIER (1958), n'interviennent que vingt et un jours après la brûlure.

Les chirurgiens du service de chirurgie infantile des Enfants Malades interviennent également après la cicatrisation. Dès quatre enfants sur lesquels nous sommes intervenus, Alfredo G... Obs. N° 14, en 1959, et Alain M... obs. N° 2 en 1951, ont été opérés respectivement deux mois et demi et un mois et demi après leur accident. Viollette B... Obs. N° 18 en 1959, treize mois plus tard. Brigitte G... obs. N° 17, en 1959 a été opérée après cicatrisation sans plus de précision et Loïc, obs. N° 13, brûlé en Novembre 1959 devait être admis après les vacances dernières, soit environ un an après sa brûlure, pour réfection de sa cicatrice.

A l'étranger sont également partisans d'une intervention tardive : VARAZIDAD - HAZANJIAN (1954), DALE (54) et GABKA (1955).

2°) TECHNIQUE OPERATOIRE -

Elle diffère peu que l'intervention soit précoce, secondaire ou tardive. Elle peut comporter un ou plusieurs temps.

1/ Principes et généralités :

a) Redonner un contour physiologique aux lèvres consiste à restaurer lèvres blanches et lèvres rouges en prévoyant au besoin l'interférence des retractions cicatricielles. Lui rendre sa fonction c'est s'efforcer de reconstituer l'orbiculaire ou de pallier son absence partielle plus souvent que totale lorsque cette reconstitution est impossible.

b) L'un des temps indispensables, souvent préliminaire consiste en l'ablation des tissus morts, nécrosés ou cicatriciels.

c) Le mode de restauration diffère selon la taille de la

lésion.

x - Lorsqu'elle est petite la suture plan par plan des éléments restants : muqueuse orbiculaire, lèvre dans ses deux portions rouge et blanche est possible.

Son mode diffère selon qu'il s'agit d'une lèvre supérieure ou d'une lèvre inférieure - Nous le verrons au chapitre suivant.

x - Si la perte tissulaire est plus importante mais reste modérée, on peut s'aider en outre, de subterfuges locaux (transfert par décollement des tissus voisins - peau et muqueuse surtout -).

x - Dans ces deux cas, la technique s'inspire des règles de la chirurgie réparatrice des malformations congénitales des lèvres (bec de lièvre uni ou bilatéral, fissure médiane des lèvres inférieures ou supérieures - Ce sont les cas les plus fréquents.

x - S'il existe de gros délabrements la greffe devient inférieure ce qui est très rare :

- soit à partir des tissus voisins par lambeau de dérotation qui peut être total ou non, uni ou bilatéral.
- soit à partir de greffons prélevés en un point quelconque du corps (région thoraco-acronale - thoraco-abdominale ou abdominale).

2/ Envisageons successivement les techniques proposées pour la reconstitution des lèvres et des commissures et plus accessoirement les interventions effectuées sur la langue.

I - RECONSTITUTION DES LEVRES SUPERIEURES -

. Il faut un défaut très minime pour recourir à la suture simple plan par plan et bord à bord.

. Les cas moyens, les plus fréquents demandent que l'on ait recours à des procédés un peu plus savants : plasties en Z, voire technique de le Mesurier si le défaut est médian pour assurer un contour plus harmonieux à la lèvre rouge, une souplesse plus grande à la lèvre blanche, grâce à la prévention des rétractions cicatricielles qu'elles assurent. On peut s'aider nous l'avons dit de décollements muqueux ou peauciers en cas de besoin.

. Lorsque les dégâts sont très importants, ce qui est l'exception des lambeaux de dérotation totaux ou non, provenant de la lèvre inférieure parfois, des joues dans
./.

la plupart des cas, soit horizontaux, soit verticaux permettent la reconstitution de la lèvre blanche. La lèvre rouge est restaurée dans un second temps par

transfert d'un lambeau de muqueuse jugale avec suture immédiate des bords de la zone de prélèvement permise par l'élasticité de la muqueuse.

Nous ne nous étendrons pas sur ces cas rarissimes.

Nous n'avons aucun exemple à fournir d'intervention sur la lèvre supérieure.

II -- RECONSTITUTION DES LEVRES INFERIEURES

Les lèvres inférieures sont, sinon plus fréquemment, du moins plus gravement atteintes que les précédentes de telle sorte qu'elles sont plus souvent l'objet de restaurations.

- En cas de lésion médiane d'importance modérée, l'intervention consiste à suturer bord à bord en prenant soin comme pour la lèvre supérieure et comme dans les lésions pour fissure médiane congénitale de la lèvre inférieure, de reconstituer l'orbiculaire.

GARNIER signale que la lèvre blanche étant toujours plus atteinte que la lèvre rouge, une petite saillie supérieure de la muqueuse en excès peut se produire, à respecter car elle s'affaisse souvent secondairement, sinon à exciser dans un deuxième temps.

Tel a été le schéma de traitement suivi pour Vincent B... Obs. N° 18 par Dr PALMERIN, ainsi que pour Alfredo G... obs. N° 14.

- Bien souvent la brûlure, plus importante a également intéressé la muqueuse mandibulaire qui adhère à la muqueuse vestibulaire de la lèvre. L'intervention est plus compliquée. Il faut restaurer le vestibule puis la lèvre ensuite.

Ainsi dans le cas de Brigitte G... Obs. N° 17 l'intervention du Professeur FEVRE a consisté à récolter

la lèvre du maxillaire inférieur afin de reconstituer le vestibule puis à suturer plan par plan, sauf le plan profond "le cul de sac tombant bien et abandonné à une réfection spontanée". Laquelle suture fut évidemment permise par la modestie relative de la cicatrice abordée.

- Cette adhérence lèvre, maxillaire inférieur, s'accompagne malheureusement fréquemment d'une réduction de taille de la lèvre rétractée. Le premier but de l'intervention est de restituer à la lèvre inférieure sa mobilité en la séparant du maxillaire, ce qui est entrepris le plus tôt possible. Cette séparation peut être réalisée soit par greffe cutanée intra-buccale, soit par transfert de muqueuse saine, mais les greffes cutanées ayant tendance à se rétracter il est préférable d'utiliser la muqueuse (HAZANJIAN). Un autre procédé de séparation est réalisé par l'interposition d'un appareil orthodontique entre muqueuses labiale et mandibulaire simplement décollées l'une de l'autre, laissé en place jusqu'à cicatrisation complète (GARNIER).

Voyons dans son détail la technique de transfert de muqueuse proposée par HAZANJIAN qu'il nomme "La technique des incisions en V et Y". qui lui donnerait de bons résultats.

Elle consiste à faire une incision transversale de la muqueuse du vestibule à la hauteur des culs de sac de la muqueuse gingivo-jugale et prolongée loin latéralement. Cette incision s'incurve en avant en deux arceaux à concavité antérieure, réunis sur la ligne médiane (Voir schémas).

Ce stratagème permet de constituer un vestibule avec la muqueuse disponible et de redonner de la hauteur à la lèvre inférieure dont la reconstitution est remise à plus tard dans l'espoir que la croissance interfèrera avec le traitement.

- Le remplacement de la peau et des muscles est un problème difficile. Il peut être réalisé en mobilisant une portion de la lèvre supérieure selon la technique dite de la "Réserve double" (HAZANJIAN).

Elle consiste à constituer deux épais lambeaux de rotation, provenant des bords du philtrum, de préférence au philtrum lui-même (voir schéma).

Le pédicule de ces greffons est sectionné, trois semaines après le premier temps opératoire.

- Lorsque l'amputation des lèvres est plus importante encore, il faut envisager une greffe.

a/ On peut utiliser un ou deux lambeaux pédiculés nasogéniens totaux (comportant peau, muscles et muqueuse) pour reconstituer la lèvre blanche, prélevés de part et d'autre du repli nasogénien.

(Selon la technique indiquée par les schémas)

C'est une technique qui chez Alain M... Obs. N° 2 aboutit à la formation d'une bride rétractile.

b/ Ces lambeaux peuvent provenir d'autres régions : lambeau para-mentonnier vertical ou cervical pédiculé d'OLLIER dont nous n'avons aucune expérience. C'est une éventualité très exceptionnelle.

c/ La lèvre rouge est reconstituée dans un second temps à partir de la muqueuse vestibulaire de la lèvre supérieure (GINETEST MERVILLE) ou de la muqueuse de voisinage (HAZANJIAN).

- Parfois l'échec d'une première greffe locale ou sa rétraction (Alain M... Obs. N° 2) ou des lésions trop étendues (brûlure associée de la lèvre supérieure) obligent à recourir au prélèvement d'un greffon thoracique qui peut être libre (Alain M... Obs N°2) interposé entre les deux fragments de la lèvre antérieure fendue en son milieu, ou par une greffe tulubée préparée à l'avance bipédiculée, déplacée en un temps (Alain M... Obs N°2) ou plusieurs (Nous n'en connaissons aucun cas).

La lèvre rouge, là encore est reconstituée dans un second temps.

Toutes ces techniques sont répétées-le exceptionnellement utilisées.

III - RECONSTITUTION DES COMMISSURES -

Elle est d'autant plus difficile qu'il existe un tissu cicatriciel dont la présence oblige alors à de multiples interventions (GARNIER).

1/ C. GARNIER commence par la reconstitution du vestibule et s'attaque dans un second temps aux lèvres, qu'il restaure en deux étapes : ablation de la cicatrice cutanée puis reconstitution de la lèvre rouge.

2/ HAZANJIAN commence par éliminer le tissu cicatriciel afin "de mieux apprécier l'étendue du tissu sain disponible nécessaire à la reconstitution des lèvres". Selon lui, la peau perdue est de peu d'importance et une présence suffisante de muqueuse permet de restituer à la bouche son dessin normal.

Il décrit deux procédés de restauration suivant l'importance de la perte de substance au coin des lèvres.

- Premier procédé : le déficit n'a pas plus d'un à un centimètre et demi de large.

Le transfert d'un lambeau de lèvre rouge adjacente pourra restaurer cette zone d'une façon adéquate. Ce qui persiste des hémilèvres rouges est décollé de sa base par une incision transversale passant d'une part à l'union lèvre rouge lèvre blanche, de l'autre à la limite muqueuse (versant buccal) de la lèvre supérieure (Voir schéma).

Cette manœuvre permet un étirement de deux hémilèvres, suffisant pour atteindre le sommet de la nouvelle commissure labiale restaurée par incision horizontale. Le sommet commissural des deux lambeaux est fixé par un point transfixiant à la peau de la joue. Le bord des hémilèvres est suturé bord à bord aux plans voisins.

- Second procédé :

Une perte de substance plus étendue de la lèvre rouge ne peut être comblée que par le transfert d'un lambeau de muqueuse buccale après reconstitution de la commissure comme précédemment.

L'extrémité commissurale des nouvelles lèvres est là encore maintenue par un point transfixiant (schémas).

IV - INTERVENTIONS SUR LA LANGUE -

Elles visent à libérer sa base d'une éventuelle gangue chéloïdienne la soudant au plancher de la bouche.

Elles peuvent avoir la surprise de mettre en évidence l'existence d'une grenouillette latente (GARNIER).

V - LES DEFICITS DES JOUES, DU PALAIS - rarissimes (cas de BROWN et FRYER, DILL) sont comblés par des greffes.

VI - Nous ne ferons que citer les méthodes visant à redonner aux lèvres leur galbe naturel par interposition entre les parois de la lèvre de fascia ou de tendon replié sur lui-même et fixé par ses deux extrémités aux buccinateurs.

B - INDICATIONS -

Elles diffèrent selon le moment où l'on voit l'enfant pour la première fois.

1/ En cas de brûlure récente :

Si la brûlure est petite, n'intéressant qu'une partie de la lèvre rouge et surtout s'il s'agit d'une brûlure médiane de la lèvre inférieure, on peut s'abstenir de toute intervention, puisque selon GARNIER même une chéloïde si elle est limitée s'atténue avec le temps.

./.

Si la brûlure est plus importante, l'abstention est encore justifiée par la fréquence des cicatrices limitées (quatre des cinq cas où s'est posée pour nous l'indication d'une intervention ultérieure). Toutefois, si l'on décide d'intervenir, il est préférable de le faire le plus tôt possible de préférence entre la quatrième et la douzième heure, sinon avant le quatrième jour pour échapper aux dangers de l'infection.

Nous avons vu que la nature des interventions est guidée par l'étendue des lésions.

2/ Brûlures vues après le quatrième jour :

L'infection a entrepris de décoller lentement l'eschare, l'intervention expose aux déboires que nous savons.

Il est plus sage d'attendre.

La chute de l'eschare n'apporte guère d'éléments nouveaux, l'aseptie de l'ulcère résiduel étant quasi impossible du fait de sa mauvaise irrigation (lésions vasculaires).

3/ Brûlures vues après cicatrisation :

On peut, si la cicatrice est petite, rester sur l'expectative et tenter de l'assouplir par des traitements locaux. C'est une iodisation iodurée qui fut entreprise avec un résultat partiel chez H... Loïc, Obs N°13 sur le conseil du Professeur FLEURY.

Sinon il faut intervenir, c'est la période favorable.

La présence de blocs chéloïdiens oblige souvent à des interventions en plusieurs temps : ce sont elles qui avec le maximum de difficultés réservent le plus de déceptions. Cette éventualité n'est heureusement pas la plus fréquente.

4/ Problèmes des réinterventions :

Les réinterventions sont la règle dans les brûlures importantes, les chéloïdes étendues - BROWN et FRYER citent le chiffre de seize interventions pratiquées sur le fils d'un médecin, brûlé à l'âge de douze mois d'une façon très importante puisque les lèvres et les commissures étaient amputées. Alain M... Obs. N°2, a subi cinq interventions dans le service du Professeur FLEURY pour chéloïdes puis rétractions de greffe.

Le problème peut se poser différemment chez l'adolescent en fin de croissance, dans l'espoir d'un résultat

./.

... 26 ...

définitif sur lequel n'interférera plus le temps (cas des restaurations différées des lèvres rouges) ou de par-faire un résultat acquis.

5/ Problème des chéloïdes :

La meilleure façon de les combattre serait de les prévenir si c'était là une chose facile à réaliser ce qui n'est pas le cas.

Si l'on a la notion d'un terrain prédisposé, ou que l'on observe lors de la cicatrisation une prolifération anarchique du conjonctif, on peut essayer d'utiliser l'action locale de l'hydrocortisone, de la radiothérapie superficielle éventuellement ou recourir à l'ionisation.

En cas de chéloïde étendue, superficielle, GARNIER conseille l'ablation par excisions successives, sans greffe.

C. - RESULTATS -

Des résultats sont satisfaisants lorsque les interventions sont limitées, effectuées sur des cicatrices peu exubérantes - ce qui est la règle en ce qui concerne nos enfants - seul Alain M... Obs N° 2 y échappe.

Ils sont moins bons sur le plan esthétique, les résultats fonctionnels étant en règle favorable en cas de gros défauts initiaux nécessitant des réinterventions multiples (BROWN - FRYER et DALE) ou de tendance aux chéloïdes (Alain M... Obs. N°2).

VIII - RESULTATS D'ENSEMBLE

PRONOSTIC.

Il est bon au décours de ces investigations cliniques et thérapeutiques de répondre à cette question qui vient à l'esprit, à laquelle certes les faits ont répondu implicitement, mais qui demande tout de même une certaine prise de position : Les brûlures électriques bucco-linguales évoquées dans leur ensemble, sont-elles graves ?

En dehors des cas d'électrocution et de leur danger de mort dont la fréquence nous échappe, quel pronostic local est-on en droit de formuler à leur propos ?

Si l'on consulte la littérature médicale, il est fort mauvais mais si l'on y regarde de plus près, on ne peut se défendre d'une certaine gêne. En effet, la plupart des articles parlent de cas particuliers en règle difficiles ou extrapolent à partir d'un petit nombre.

Nous ne prétendons pas avec nos quarante trois observations avoir effectué le travail d'ensemble qui serait souhaitable et permettrait de conclure, nous pensons qu'il permet peut-être, sans y atteindre, de cerner d'un peu plus près la vérité - "Notre vérité" - qu'elle est-elle ?

Sur quarante trois enfants, dix huit, soit près de la moitié - ont une brûlure de la langue dont ils ne souffriront en aucune façon et qui restera le seul témoin latent de leur mésaventure.

Des vingt cinq restants, nous savons que cinq ont subi une intervention dont quatre avec succès et qu'une majorité des autres n'étaient pas gravement atteints.

Notre petite vérité est donc que les brûlures électriques bucco-linguales si impressionnantes lorsqu'on les voit pour la première fois, ont un pronostic lointain et global beaucoup plus favorable qu'on ne serait en droit de l'espérer.

Mais, direz-vous, et les amputations monstrueuses, et les chéloïdes envahissantes ?, nous ne pouvons pas les négliger et c'est pourquoi nous insisterons si lourdement dans notre résumé et conclusion sur la prévention de ces brûlures électriques.

IX - R E S U M E & C O N C L U S I O N

Les brûlures électriques buccolinguales sont rares dans le cadre des brûlures de l'enfance mais fréquentes par rapport aux brûlures électriques d'origine domestique à cet âge. Elles touchent avec prédilection les jeunes enfants.

Les brûlures peuvent s'accompagner d'une électrocution. Localement elles réalisent une brûlure du troisième degré dont l'histologie est spécifique aux brûlures électriques et qui peut atteindre tout ou une partie des lèvres, une commissure et au minimum l'extrémité de la langue.

Le préjudice esthétique et fonctionnel qui en résulte en dehors des brûlures de la langue dont le pronostic est toujours favorable, est souvent grave mais moins, semble-t-il qu'il n'est accoutumé de la dire.

La chirurgie de ces brûlures a d'autant plus de chance de succès qu'elle intervient sur des lésions plus limitées, ce qui paraît l'éventualité la plus fréquente. C'est une chirurgie difficile, aux résultats décevants lorsque les brûlures sont étendues ou que l'enfant est prédisposé aux cicatrices chéloïdiennes.

Le meilleur moyen de lutter contre elles est en fait, de les prévenir.

Les fils intermédiaires terminés à chaque extrémité par une fiche, connus sous le nom de "rallonge ou prolongateurs" de prise de courant sont en cause. C'est la fiche libre, la fiche murale étant en place, qui est portée à sa bouche par l'enfant et produit les dégâts que nous savons.

La prévention consiste donc, sinon à supprimer ces fils intermédiaires, du moins à les solidariser à l'appareil qu'ils relient au secteur par un moyen simple (Scotch ou Chatterton appliqué sur les fiches intermédiaires), de telle sorte que l'enfant ne puisse libérer la fiche dangereuse, et surtout que l'adulte ne soit pas tenté de débrancher à son niveau.

Encore faut-il porter à la connaissance du public ce que sont ces brûlures et les moyens de les prévenir.

./.

Notre regret est que ce travail ne puisse y parvenir.

C'est malheureusement là une ambition que dépassent nos propres possibilités, pour laquelle nous nous contenterons donc de formuler des vœux.

B I B L I O G R A P H I E

- 1 - La presse médicale - MORHARDT - 8 Mai 1940.
- 2 - "Electric burns of mouth" - J.C. TUMMERS, 1949.
- 3 - "Electric injury of mouth, rare case". SCHLEYER
1949.
- 4 - "Injuries of région of oral cavity by strong current". LINDEMAN and LEMPKE. 13 Juin 1941.
- 5 - Skingrafting. J.B. BROWN, FRANK MAC DOWEL 1951.
- 6 - Actualites odonto stomatologiques N° 18, LEBOURG,
BUREAU, LECCLAIRE., selon M. PIERRE.
- 7 - Pediatricke kisty, 6° année n° 5, Sept, Oct. 1951
p. 267-275.
- 8 - Revue du praticien. BARTHES et FRANÇOIS, 1er Janv.
1952, tome 2, n° 1 p. 5.....
- 9 - Archives of surgery (Chicago) 1953.66. N° 4 April,
p. 496-511.
- 10 - British journal of plastic surgery. DALE. April 54
Edinburgh P. 44-46.
- 11 - Plastic and reconstructive surgery, Vol. 14, Au-
gust 1954, n° 2.P. 126-137 KENNETH, PICK M.D.,
FRANCK MASTERS M.D., NICOLAS GORGIADIS, DDS, M.S
and C. HORTON (North carolina DURHAM).
- 12 - Revue du praticien. LAGROT, ANTOINE 21 Dec. 1954,
n° 4 P. 3097 à 3151.
- 13 - The american journal of surgery New-York. VARAZTADH
HAZANJIAN MD, ARAM, ROOPENIAN (massachusetts). 1954
88. N° 6 Dec. P. 884 à 890.
- 14 - Journal of the international college of surgeons.
VOLNEY, HYSLOP, MILLER, April 1955
- 15 - Plastic and reconstructive surgery (Baltimore)
ASHLEY MD. April 1955.
- 16 - Vie et bonté GOSSET, ZIMMER Mai 1955, n° 66, p. 2-6
- 17 - Kinder aztliche praxis. Von G. GABKA .(Berlin),
23 Jahrg. dez 1955, 23 Heft 12 P. 532 ...
- 18 - Plastic and reconstructive surgery J.P. WEBSTER,
vol. 16 dec 1955, n° 6, P. 434.
- 19 - Entretiens de Bichat C. GARNIER 1956, p. 21 à 24.
- 20 - Semaine des hôpitaux, Annales de chirurgie plasti-
que, GINETEST, MERVILLE nov. 1956, n° 32, p. 169
à 188. ./.

- 21 - BRITISH MEDICAL JOURNAL. London June 1956 N° 4980 I
p. 1379 à 1386.
- 22 - Weiner klinische wochenschrift 23 marz 1956.68 Heft
12 P. 215 à 218.
- 23 - Plastic and reconstructive surgery.VOLNEY HYSLOP
oct. 1957 VOL.20, n° 4 p. 315 à 317.
- 24 - British journal of plastic surgery. MUIR MBE RCS.
Vernon January 1958 Vol. 10, n° 4.
- 25 - Traumatologie infantile. CHIGOT ESTEVE 10 Avril 1958.
- 26 - Anatomie . ROUVIERE TESTUT.
- 27 - Vie médicale Avril 1958 R.C. FRANCOIS 39, n° 4, p.
395 à 400.
- 28 - British journal of plastic surgery. Edinbrough, July
1958 11. N° 2, p. 134.
- 29 - Mémoires de l'académie de chirurgie. LAURENCE ANGLADE
DE SOULIER 84. N° 26 27, p. 82, séances des 29 Oct.
et 5 Nov. 1958.
- 30 - La semaine des hôpitaux. Annales de chirurgie plas-
tique. LAGROT ANTOINE dec. 1958, tome 3, n° 4, p.261
273.
- 31 - American journal of surgery. dec. 1958 vol. 96;n,6
p. 815 à 819.
- 32 - Encyclopédie médico chirurgicale.Maladies par agents
physiques R.C. FRANCOIS Janv. 1959.
- 33 - Journal de chirurgie de NANTES.MOUSSEAU LEBEAUPIN,
Avril 1959, tome 77. N° 4, p.432 à 446.
- 34 - British journal of plastic surgery MARY DEVIES.Edin-
burgh. tome 2, n° 4 January 1959.
- 35 - Encyclopédie médico chirurgicale.Intoxications, ma-
ladies par agents physiques. PERVES. "Brûlures élec-
triques". 1960. Tome 2, n° 16515 à 10.
- 36 - Congrès de chirurgie plastique. Oct. 1960.M.PIERRE.
Marseille.

8